

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Avaliação hidrológica e sustentabilidade hídrica em bacias hidrográficas do
Bioma Cerrado**

Mariana Faria Veloso
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

MARIANA FARIA VELOSO

**Avaliação hidrológica e sustentabilidade hídrica em bacias hidrográficas do
Bioma Cerrado**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

V443a Veloso, Mariana Faria, 1995-
2025 Avaliação hidrológica e sustentabilidade hídrica de bacias
hidrográficas do Bioma Cerrado / Mariana Faria Veloso. –
Viçosa, MG, 2025.

1 tese eletrônica (99 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 89-99.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.568>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Bacias hidrográficas - Análise. 2. Cerrados.
3. Sustentabilidade. 4. Desenvolvimento de recursos hídricos.
I. Rodrigues, Lineu Neiva, 1968-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 630.25148

MARIANA FARIA VELOSO

Avaliação hidrológica e sustentabilidade hídrica em bacias hidrográficas do Bioma Cerrado

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 30 de julho de 2025.

Assentimento:

Mariana Faria Veloso
Autora

Lineu Neiva Rodrigues
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 04/09/2025 às 16:23:11 e pelo orientador em 04/09/2025 às 18:55:43. 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 **ICJK.RJOH.C4AD** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e proteção ao longo de toda essa jornada. Aprendi que a felicidade não está apenas no ponto de chegada, mas em cada passo do caminho até ela.

A meu esposo Heverton, por todo amor, amizade e suporte, principalmente nos momentos mais difíceis. Sua presença fez toda a diferença.

À minha base, meus pais Sandra e Welington, por todo o amor, carinho e apoio incondicional. Às minhas irmãs, Camilla e Carol, pela amizade, companheirismo e incentivo ao longo desta caminhada acadêmica.

Aos meus cachorrinhos, Ralf e Garu, companheiros de escritório durante boa parte deste estudo, que tornaram essa caminhada mais leve e cheia de passeios, muito dos quais inspiraram ideias e soluções para este estudo.

Ao professor Lineu Neiva Rodrigues, meu orientador, pela orientação, confiança depositada, partilha de conhecimentos e pelo exemplo de profissionalismo. Ao professor Demetrius David da Silva, meu coorientador, pela paciência, disponibilidade e ensinamentos valiosos.

Aos meus amigos da UFV, Fernanda e David, por todo o companheirismo durante toda essa jornada de pesquisa, desde o mestrado até o doutorado.

Enfim, o meu muito obrigada a todos que contribuíram de alguma forma na execução deste estudo.

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).

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo”.
(Nelson Mandela)

RESUMO

VELOSO, Mariana Faria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2025. **Avaliação hidrológica e sustentabilidade hídrica em bacias hidrográficas do Bioma Cerrado.** Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.

O Cerrado, principal fronteira agrícola do Brasil e região estratégica para a segurança hídrica nacional, tem enfrentado desafios crescentes na gestão dos recursos hídricos, impulsionados pelas mudanças climáticas, intensificação da agricultura e alterações no uso e cobertura da terra. Este estudo desenvolveu uma abordagem integrada para analisar e classificar os regimes hidrológicos do bioma Cerrado, composta por três estudos: análises de tendências de precipitação e vazão, classificação hidrológica de bacias hidrográficas e desenvolvimento de um índice de sustentabilidade hídrica do período seco. Inicialmente, foram avaliadas as tendências anuais e mensais da precipitação total e das vazões mínima (Q_7), média (Q_{mean}) e máxima (Q_{max}) em 4.538 bacias do Cerrado entre 2003 e 2019, com destaque para a redução significativa desses indicadores, principalmente nas regiões sudeste, leste e central do bioma. Em seguida, foi realizada a classificação hidrológica das bacias com base em assinaturas hidrológicas, revelando quatro classes distintas de regimes de vazão influenciadas por variáveis climáticas, fisiográficas e antrópicas. Por fim, foi desenvolvido o Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps), integrando sete indicadores representativos da disponibilidade hídrica, regulação hídrica, clima, pressão antrópica e mitigação, permitindo identificar regiões mais ou menos sustentáveis durante a estação seca. As análises revelaram padrões espaciais heterogêneos de sustentabilidade hídrica, com destaque para áreas mais críticas no norte do Cerrado e potenciais zonas de conflito entre oferta e demanda de água. Os resultados reforçam a necessidade de estratégias adaptativas e regionalizadas de gestão, capazes de conciliar a conservação dos recursos hídricos com a expansão das atividades agrícolas no bioma.

Palavras-chave: análise de tendência; classificação hidrológica; estação seca; gestão de recursos hídricos; sustentabilidade hídrica

ABSTRACT

VELOSO, Mariana Faria, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2025. **Hydrological assessment and water sustainability in the Cerrado Biome watersheds.** Adviser: Lineu Neiva Rodrigues.

The Cerrado, Brazil's main agricultural frontier and a strategic region for national water security, has faced growing challenges in water resource management, driven by climate change, agricultural intensification, and changes in land use and land cover. This study developed an integrated approach to analyze and classify the hydrological regimes of the Cerrado biome, consisting of three studies: analysis of precipitation and streamflow trends, hydrological classification of river basins, and development of a dry-season water sustainability index. Initially, annual and monthly trends in total precipitation and minimum (Q_7), mean (Q_{mean}), and maximum (Q_{max}) streamflows were assessed in 4.538 Cerrado basins between 2003 and 2019. Significant reductions in these indicators were highlighted, particularly in the southeast, east, and central regions of the biome. Next, the basins were classified based on hydrological signatures, revealing four distinct classes of flow regimes influenced by climatic, physiographic, and anthropogenic variables. Finally, the Dry Season Water Sustainability Index (ISHps) was developed, integrating seven indicators representing water availability, water regulation, climate, anthropogenic pressure, and mitigation, allowing the identification of more or less sustainable regions during the dry season. The analyses revealed heterogeneous spatial patterns of water sustainability, particularly in the most critical areas in the northern Cerrado and potential zones of conflict between water supply and demand. The results reinforce the need for adaptive and regionalized management strategies capable of reconciling water resource conservation with the expansion of agricultural activities in the biome.

Keywords: trend analysis; hydrological classification ; dry season; water resource management; water sustainability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Artigo 1: Análises de tendências de precipitação e vazão em bacias hidrográficas do Cerrado brasileiro

Figura 1. (a) Estados e biomas brasileiros e (b) regiões hidrográficas do Brasil 19

Figura 2. Distribuição espacial das tendências para a precipitação total (P_t) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) 22

Figura 3. Distribuição espacial das tendências para a vazão mínima (Q_7) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) para as séries anual e mensal da Q_7 24

Figura 4. Distribuição espacial das tendências para a vazão média (Q_{mean}) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) para as séries anual e mensal da Q_{mean} . 25

Figura 5. Distribuição espacial das tendências para a vazão máxima (Q_{max}) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) para as séries anual e mensal da Q_{max} ... 26

Figura 6. Número de ottobacias e ano de mudança das séries (a) P_t , (c) Q_7 , (e) Q_{mean} e (g) Q_{max} identificado pelo teste de Pettitt e médias anuais das ottobacias para as séries de (b) P_t , (d) Q_7 , (f) Q_{mean} e (h) Q_{max} 30

Figura 7. Mapas de uso e cobertura da terra do Cerrado nos anos de (a) 2003, (b) 2007, (c) 2011, (d) 2015 e (e) 2019, e as (f) porcentagens gerais das classes no período de 2003 e 2019. 32

Figura 8. Evolução das áreas irrigadas no Cerrado considerando os anos de 2003, 2007, 2011, 2015 e 2019. 34

Artigo 2: Classificação hidrológica das bacias hidrográficas do Cerrado

Figura 1. Localização do Cerrado em comparação aos: (a) demais biomas brasileiros e (b) regiões hidrográficas 41

Figura 2. (a) Variação altimétrica e (b) classes de solo predominantes no Cerrado*	42
Figura 3. (a) Ottobacias nível 5 do bioma Cerrado e (b) os boxplots das médias mensais da precipitação, (c) vazão e (d) evapotranspiração de referência (ETo)	49
Figura 4. Distribuição espacial das assinaturas hidrológicas (a) vazão média anual (Q), (b) vazão de permanência Q_{10} , (c) vazão de permanência Q_{90} , (d) declividade da curva de permanência (S_{FDC}), (e) elasticidade da vazão (E_{QP}), (f) coeficiente de escoamento (RR), (g) índice de vazão de base (BFI), (h) índice de aridez (AI), (i) coeficiente de variação da vazão (CV), (j) frequência das vazões baixas (LQ_{freq}), (k) duração das vazões baixas (LQ_{dur}), (l) frequência das vazões altas (HQ_{freq}) e (m) duração das vazões altas (HQ_{dur}).	51
Figura 5. Distribuição espacial da classificação hidrológica das ottobacias do Cerrado (a) e boxplots representando a variação das classes para as assinaturas: (b) vazão média diária anual (Q), (c) vazão de permanência Q_{10} , (d) vazão de permanência Q_{90} , (e) declividade da curva de permanência (S_{FDC}), (f) elasticidade da vazão (EQP), (g) coeficiente de escoamento (RR), (h) índice de vazão de base (BFI), (i) índice de aridez (AI), (j) coeficiente de variação da vazão (CV), (k) frequência das vazões baixas (LQ_{freq}), (l) duração das vazões baixas (LQ_{dur}), (m) frequência das vazões altas (HQ_{freq}) e (n) duração das vazões altas (HQ_{dur}).	54
Figura 6. Valores médios diários de precipitação, evapotranspiração e vazão para cada uma das quatro classes hidrológicas identificadas no Cerrado	58
Figura 7. Importância (%) e correlação de Spearman entre as assinaturas hidrológicas e as variáveis climáticas, físicas e de uso e cobertura da terra para as Classes 1, 2, 3 e 4	60
Figura 8. (a) Zonas climáticas de Köppen do Cerrado, (c) ecorregiões do Cerrado, (e) regiões hidrográficas do Cerrado e (b, d, f) distribuição espacial do Índice de Diversidade Shannon Normalizado	63

Artigo 3: Índice de sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do Cerrado

Figura 1. (a) Localização do bioma Cerrado no Brasil e (b) biomas brasileiros	68
---	----

Figura 2. Distribuição espacial dos indicadores normalizados do período seco que compõem o ISHps: (a) vazão mínima Q_{95} , (b) declividade da curva de permanência (S_{FDC}), (c) Índice de Vazão de Base (BFI), (d) coeficiente de recessão (k), (e) Índice de Aridez (IA), (f) percentual médio de área irrigada e (g) percentual médio de vegetação nativa.....	76
Figura 3. (a) Distribuição espacial do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps) das bacias do bioma Cerrado e (b) distribuição de frequência dos valores de ISHps	78
Figura 4. (a) Sobreposição do ISHps com os: polos de irrigação do Cerrado e (b) pivôs centrais ativos de 2019.....	81
Figura 5. (a) Regiões homogêneas considerando todos os indicadores que compõe o ISHps e (b) boxplots dos indicadores do ISHps por classe.....	82
Figura 6. Variação do ISHps e dos seus indicadores ao longo dos perfis Oeste-Leste e Sul-Norte	84

LISTA DE TABELAS

Artigo 1: Análises de tendências de precipitação e vazão em bacias hidrográficas do Cerrado brasileiro

Tabela 1. Coeficiente de Spearman entre as vazões Q_7 e Q_{mean} e as classes de uso e cobertura da terra 33

Artigo 3: Índice de sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do Cerrado

Tabela 1. Indicadores selecionados para o desenvolvimento do ISHps 70

SUMÁRIO

1. Introdução geral	13
2. Artigos científicos	16
2.1 Artigo 1: Análises de tendências de precipitação e vazão em bacias hidrográficas do Cerrado brasileiro	16
1. Introdução.....	16
2. Material e métodos	18
2.1 Área de estudo	18
2.2 Base de dados	19
2.3 Análise de tendência da precipitação e vazão	20
3. Resultados e discussão	21
3.1 Tendências das séries mensais e anuais da precipitação e vazão das bacias hidrográficas do Cerrado	21
3.2 Avaliação dos efeitos climáticos e do uso e cobertura da terra nos regimes pluviais e fluviais das bacias hidrográficas do Cerrado.....	28
3.3 Análise integrada: implicações no Cerrado.....	35
4. Conclusões.....	36
2.2 Artigo 2: Classificação hidrológica das bacias hidrográficas do Cerrado	38
1. Introdução.....	38
2. Material e métodos	40
2.1 Área de estudo	40
2.2 Base de dados	43
2.3 Assinaturas hidrológicas.....	43
2.4 Classificação das bacias hidrográficas do Cerrado.....	47
2.5 Importância das variáveis	47
2.6 Índice de Diversidade de Shannon (H')	48
3. Resultados e discussão	49
3.1 Valores médios de vazão, precipitação e ETo nas bacias do bioma Cerrado	49

3.2. Distribuição espacial das assinaturas hidrológicas	50
3.3 Classificação hidrológica das bacias hidrográficas	54
3.4 Importância das variáveis na classificação hidrológica.....	59
3.5 Aplicação do Índice de Diversidade de Shannon	62
4. Conclusões.....	64
2.3 Artigo 3: Índice de Sustentabilidade Hídrica de Bacias Hidrográficas do Cerrado	65
1. Introdução.....	65
2. Material e métodos	67
2.1 Área de estudo	67
2.2 Desenvolvimento do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco.....	69
2.3 Cálculo do ISHps.....	75
2.4 Identificação das regiões homogêneas	75
3. Resultados e discussão	76
3.1 Indicadores do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco	76
3.2 Análise espacial do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco.....	78
3.3 Regiões homogêneas dos indicadores do ISHps	82
3.4 Análise integrada da sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do Cerrado	83
4. Conclusões.....	86
3. Conclusões gerais.....	87
Referências	89

1. Introdução geral

O bioma Cerrado é considerado a principal fronteira agrícola do Brasil, ocupando uma posição estratégica tanto no cenário econômico quanto no contexto de segurança alimentar e hídrica no país. Sua extensão de aproximadamente dois milhões de quilômetros quadrados, associada à sua localização central e aos padrões geomorfológicos, conferem ao Cerrado um papel fundamental na disponibilidade hídrica, refletindo diretamente em um potencial produtivo para o país (CAIXETA; CARNEIRO, 2024; RODRIGUES et al., 2024).

Atualmente, o Cerrado é responsável por cerca de 60% da produção agrícola brasileira, com destaque para culturas como algodão, milho e soja, sendo esta última responsável por 22% das exportações mundiais (MAPBIOMAS, 2024; WEF, 2024). Além disso, mais da metade da área irrigada do Brasil está concentrada nesse bioma (ANA, 2021), chegando a abrigar 80% dos pivôs centrais do país (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019).

Além da expressiva importância agrícola, o Cerrado abriga nascentes que alimentam grandes bacias hidrográficas, como as dos rios São Francisco, Tocantins, Araguaia, Parnaíba, Paraná e Paraguai (ANA, 2012; SILVA et al., 2024), desempenhando um papel estratégico na geração e manutenção dos fluxos hidrológicos. Essa função é essencial para o setor energético, uma vez que aproximadamente 77% das usinas hidrelétricas do país dependem de rios cujas nascentes se localizam nesse bioma (ANEEL, 2022; SANTANA; RODRIGUES, 2024).

Contudo, a intensificação da agricultura, aliada às mudanças climáticas e alterações no uso e cobertura da terra, tem imposto desafios crescentes à gestão de recursos hídricos no Cerrado (POUSA et al., 2019; CORREIA FILHO et al., 2021; HOFMANN et al., 2021). Verificam-se a redução das precipitações, o aumento das temperaturas e o prolongamento da estação seca, que somados à pressão pela irrigação, comprometem os fluxos hídricos e elevam a competição entre os múltiplos usos dos recursos hídricos (HOFMANN et al., 2023; SANO et al., 2024).

A gestão eficiente dos recursos hídricos exige o entendimento da dinâmica hidrológica das bacias hidrográficas do Cerrado, os quais são moldados por fatores climáticos, fisiográficos e de uso e cobertura da terra, como precipitação, solo, relevo e área de drenagem (MCMILLAN, 2019; FERRAZZI et al., 2021). Entretanto, estudos apontam alterações hidrológicas significativas em algumas bacias do bioma, como maior variabilidade das vazões e modificações na sazonalidade de eventos extremos (FERRAZ et al., 2024; TEIXEIRA et al., 2024). Tais alterações desafiam a gestão, uma vez que os planos de recursos hídricos ainda se

baseiam na hipótese de estacionariedade das séries hidrológicas.

Nesse contexto, a não estacionariedade, ou seja, a existência de tendências nas séries temporais, deve ser considerada nos modelos hidrológicos, uma vez que sua negligência pode levar a decisões equivocadas na alocação da água (MILLY et al., 2008; YILMAZ; TOSUNOGLU, 2024). A análise de tendência surge como uma ferramenta fundamental nesse diagnóstico, permitindo verificar mudanças nas séries de precipitação e vazão ao longo do tempo. Para esse fim, destacam-se os testes não paramétricos como o de Mann-Kendall, recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (KUMAR et al., 2009), e os testes de Sen's Slope (SEN, 1968) e Pettitt (PETTITT, 1979), que estimam respectivamente a magnitude e o ponto de mudança dessas tendências.

Ainda que existam estudos de tendência para o Cerrado (PENEREIRO et al., 2016; FERRAZ et al., 2021; HOFMANN et al., 2023), muitos deles se baseiam em estações pontuais, o que limita sua representatividade em escala regional. Assim, torna-se necessário um diagnóstico mais abrangente que contemple todas as bacias do bioma e suas especificidades climáticas, fisiográficas e antrópicas.

Outro enfoque relevante é a classificação hidrológica, que permite agrupar bacias com padrões de regime semelhantes (KENNARD et al., 2010; OLDEN et al., 2012). A classificação hidrológica ou do regime dos rios traz uma abordagem que pode auxiliar na compreensão dos padrões fluviais em nível de bacias hidrográficas. Essa classificação tem sido amplamente utilizada para identificar padrões hidrológicos espaciais, contribuindo para definição de estratégias de alocação de água, conservação ambiental e avaliação de impactos das mudanças do clima e do uso da terra sobre os regimes hídricos (SAWICZ et al., 2011; DAVID et al., 2019; MCMILLAN, 2020; ALMAGRO et al., 2024).

Além disso, no contexto de escassez hídrica, principalmente durante o período seco, cresce a necessidade de ferramentas que integrem múltiplos fatores ambientais, climáticos e antrópicos. Os índices hidrológicos têm se consolidado como instrumentos valiosos para integrar essas dimensões em uma métrica única, auxiliando na tomada de decisão e no ordenamento do território (SULLIVAN et al., 2002; LIU et al., 2017). No entanto, poucos índices são voltados especificamente à sustentabilidade hídrica do Cerrado, particularmente durante a estação seca, fase crítica marcada pela baixa recarga, elevada evapotranspiração e alta demanda por irrigação (FERREIRA et al., 2023; ALTHOFF et al., 2024; RODRIGUES et al., 2024).

Diante desse contexto, esta tese teve como objetivo geral avaliar os regimes hidrológicos e a sustentabilidade hídrica das bacias hidrográficas do bioma Cerrado, por meio da análise de tendências de precipitação e vazão, da classificação hidrológica das bacias com base em assinaturas hidrológicas e do desenvolvimento de um índice representativo da sustentabilidade hídrica durante o período seco, visando subsidiar estratégias de gestão e uso sustentável dos recursos hídricos na região. Para isso, esta tese foi estruturada na forma de artigos, sendo que o primeiro artigo consiste em uma análise de tendência das séries históricas de precipitação e vazão de 4.538 ottobacias do Cerrado. O segundo artigo apresenta a classificação hidrológica dessas bacias com base em assinaturas hidrológicas e sua relação com fatores climáticos, físicos e de uso e cobertura da terra. E o terceiro artigo, propõe o Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps), composto por sete indicadores representativos da disponibilidade, regulação, pressão e mitigação hídrica. Os resultados contribuem para o avanço do conhecimento sobre os regimes fluviais do Cerrado e oferecem suporte técnico-científico para o planejamento territorial, formulação de políticas públicas e a promoção do uso sustentável dos recursos hídricos no bioma.

2. Artigos científicos

2.1 Artigo 1: Análises de tendências de precipitação e vazão em bacias hidrográficas do Cerrado brasileiro

Resumo: O Cerrado, principal fronteira agrícola do Brasil, tem enfrentado crescentes desafios relacionados à alocação de recursos hídricos, impulsionados pelas mudanças climáticas e alterações no uso e cobertura da terra verificados nos últimos anos no bioma. Diante disso, o presente estudo analisou as tendências anuais e mensais da precipitação total (P_t) e das vazões mínima de 7 dias (Q_7), média (Q_{mean}) e máxima (Q_{max}) em 4.538 bacias hidrográficas do Cerrado, no período de 2003 a 2019, utilizando testes estatísticos não paramétricos (Mann-Kendall, Sen's Slope e Pettitt). Os resultados da análise anual apontaram significativas tendências de redução da P_t (898 bacias) e das vazões Q_7 (1.593 bacias), Q_{mean} (2.566 bacias) e Q_{max} (2.312 bacias), ocorrendo principalmente nas porções sudeste, leste e central do bioma, regiões fortemente impactadas pela intensificação da seca e pela expansão agrícola. As análises mensais revelaram uma redução da precipitação em meses tipicamente chuvosos, como janeiro e dezembro, contribuindo para o prolongamento do período seco. O teste de Pettitt identificou o intervalo entre 2009 e 2014 como o período mais crítico de mudança, coincidindo com eventos climáticos extremos associados ao El Niño e La Niña, além da rápida expansão agrícola, que aumentou em 13,2% no período analisado. Esses resultados destacam a vulnerabilidade do Cerrado frente à variabilidade climática e às mudanças no uso da terra, reforçando a urgência da adoção de estratégias sustentáveis de gestão hídrica, capazes de equilibrar as crescentes demandas agrícolas com a conservação dos recursos hídricos e ambientais no bioma.

Palavras-chave: Mann-Kendall. Mudanças climáticas. Não estacionariedade. Pettitt. Uso e cobertura da terra.

1. Introdução

O Cerrado é a principal fronteira agrícola do Brasil, com destaque nas produções de culturas anuais e perenes como a soja, milho, algodão e cana-de-açúcar (IBGE, 2023), desempenhando um papel estratégico na economia nacional. Nessa região, onde a demanda de irrigação está crescendo e as disputas pelo uso de recursos hídricos são cada dia maiores, é fundamental compatibilizar os usos e alocar a água de forma mais equitativa, a fim de garantir a sustentabilidade das atividades produtivas e das populações que dependem desse recurso.

Em regiões como o Cerrado, onde a agricultura é intensiva e fortemente dependente da disponibilidade hídrica, e os efeitos climáticos induzem uma variabilidade na oferta e na demanda por recursos hídricos, é importante que se desenvolva um planejamento estratégico que considere o potencial de crescimento da agricultura irrigada e de uso de recursos hídricos pelos múltiplos usuários, principalmente diante das mudanças climáticas globais.

Vários estudos têm indicado o efeito das mudanças climáticas (ALLAN et al., 2020; YANG et al., 2021; WANG; LIU, 2023) e das atividades antrópicas (SANTOS et al., 2020; ROY et al., 2022; ZHENG et al., 2023) no ciclo hidrológico. No Cerrado, foram verificados o aumento da temperatura e a redução da precipitação (CORREIA FILHO et al., 2021; HOFMANN et al., 2021), além de alterações no uso e cobertura da terra (FERRAZ et al., 2021; POMPEU et al., 2024). Essas mudanças nos padrões do clima e do uso da terra podem influenciar de forma expressiva nos processos hidrológicos, comprometendo a gestão, uma vez que os planos de recursos hídricos são elaborados considerando a hipótese de estacionariedade, ou seja, não consideram a ocorrência de mudanças significativas dos dados das séries hidrológicas ao longo do tempo.

Nesse contexto, a suposição da estacionariedade de séries temporais em situações em que, na verdade, não são estacionárias, pode resultar em estimativas equivocadas e decisões inadequadas na alocação de recursos hídricos. Yilmaz e Tosunoglu (2024) demonstraram que ao incorporar a não estacionariedade em séries temporais, como as de vazões mínimas, os resultados são significativamente mais precisos quando comparado àqueles obtidos sob a suposição de estacionariedade, reforçando a importância de considerar a não estacionariedade ao realizar a gestão dos recursos hídricos em períodos de seca. Da mesma maneira, Milly et al. (2008) discutem a utilização da suposição de estacionariedade nos sistemas hidrológicos, e o quanto esta hipótese é comprometida pelas mudanças climáticas e antrópicas. Além disso, os autores reforçam a necessidade de que modelos probabilísticos considerem a não estacionariedade e as incertezas associadas, para otimizar o planejamento dos sistemas de gestão de recursos hídricos.

Diante da necessidade de incorporar a não estacionariedade nas análises hidrológicas, a análise de tendência surge como uma ferramenta para verificar mudanças nas séries temporais de variáveis hidrológicas, como precipitação e vazão. Para a análise de tendência de séries históricas de dados hidrológicos podem ser utilizados testes paramétricos ou não paramétricos, contudo, o uso de testes não paramétricos se apresenta como mais adequado para a análise de tendência em decorrência ao fato de requerem menos suposições sobre os dados, como a não necessidade de assumir uma distribuição de probabilidade (RIBEIRO et al., 2021).

Dentre os testes não paramétricos tem-se o teste de Mann-Kendall, que é recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), sendo amplamente utilizado em estudos para detectar tendência de séries temporais de dados hidrológicos e climáticos (Kumar et al., 2009). No entanto, quando as séries temporais apresentam autocorrelação significativa, o teste de Mann-Kendall Modificado é o mais adequado (HAMED; RAO, 1998). Em complemento ao teste de Mann-Kendall, têm-se os testes de Sen's Slope (SEN, 1968) e Pettitt (PETTITT, 1979) que são testes não paramétricos que permitem obter a magnitude das tendências e o ano de mudança na tendência das séries, respectivamente, contribuindo assim para uma melhor análise das tendências.

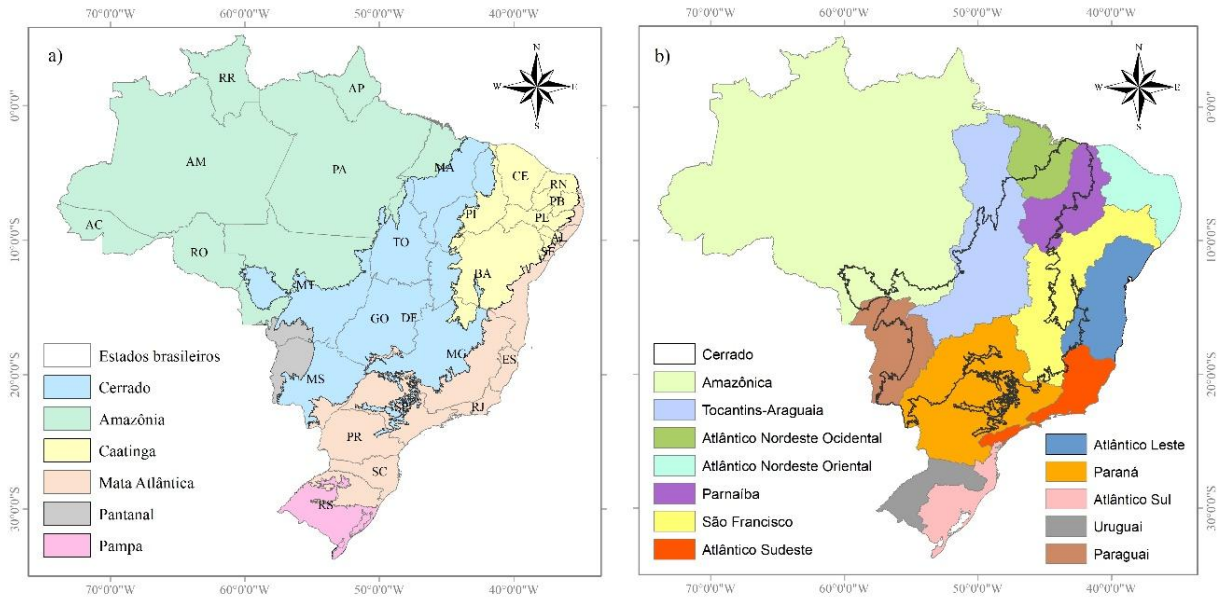
Embora existam estudos de tendência em séries hidrológicas de precipitação, vazão e evapotranspiração para o Cerrado (PENEREIRO et al., 2016; CAMPOS; CHAVES, 2020; FERRAZ et al., 2021; HOFMANN et al., 2023; KOLLING NETO; SOUZA, 2024), a maioria dessas análises se concentra em dados provenientes de estações hidrometeorológicas, assim, os resultados são frequentemente locais e/ou interpolados para algumas bacias hidrográficas do bioma. Contudo, o Cerrado ainda carece de análises mais abrangentes e integradas, que possibilitem uma avaliação conjunta de todas as suas bacias hidrográficas, considerando, principalmente, a influência das alterações climáticas e do uso e cobertura da terra nos regimes pluviais e fluviais dessas bacias.

Entender as tendências do comportamento de variáveis hidrológicas é estratégico para a gestão de recursos hídricos. Assim, o objetivo desse estudo foi analisar as tendências das séries mensais e anuais da precipitação total e das vazões mínima, média e máxima em bacias hidrográficas do Cerrado.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, abrangendo cerca de 2 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 24% do território nacional (Figura 1a). A sua localização estratégica confere a esse bioma uma grande diversidade em seus padrões geomorfológicos, geológicos, pedológicos, ecológicos e climáticos, sendo o uso e a cobertura da terra bastante influenciados por esses fatores ambientais (SANTANA; RODRIGUES, 2024).



Estados brasileiros: AM = Amazonas; AC = Acre; RO = Rondônia; RR = Roraima; AP = Amapá; PA = Pará; TO = Tocantins; MA = Maranhão; PI = Piauí; CE = Ceará; RN = Rio Grande do Norte; PB = Paraíba; PE = Pernambuco; AL = Alagoas; SE = Sergipe; BA = Bahia; MT = Mato Grosso; MS = Mato Grosso do Sul; GO = Goiás; DF = Distrito Federal; MG = Minas Gerais; ES = Espírito Santo; RJ = Rio de Janeiro; SP = São Paulo; PR = Paraná; SC = Santa Catarina; RS = Rio Grande do Sul.

Figura 1. (a) Estados e biomas brasileiros e (b) regiões hidrográficas do Brasil

Do ponto de vista hidrológico, o Cerrado desempenha um papel importante na regulação do ciclo da água no Brasil, pois é responsável pela captação de águas pluviais que contribuem para oito das doze regiões hidrográficas brasileiras (Figura 1b) (ALTHOFF; RODRIGUES, 2024).

Segundo a classificação climática de Köppen (KÖPPEN, 1936), o clima do Cerrado é tropical de savana com inverno seco (Aw), tendo as chuvas uma média anual de 1.415 mm, apresentando uma grande variabilidade espacial e temporal (ALTHOFF et al., 2024).

A hidrogeologia do Cerrado também desempenha um forte papel na regulação do ciclo hidrológico do bioma, especialmente durante a estação seca. Os aquíferos da região são classificados como intergranulares, fraturados e cársticos, podendo ser livres ou confinados, com dimensões que variam entre regionais e locais (AUGUSTO; CAMPOS, 2024). Além disso, os solos do Cerrado, predominantemente Latossolos (VELOSO et al., 2024), são profundos e possuem ótima drenagem, mas apresentam baixa fertilidade natural devido à presença de óxidos de ferro e alumínio (SANTOS et al., 2018).

2.2 Base de dados

A base de dados hidrológica utilizada neste estudo foi o HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022), que é composta por dados diários de vazão e precipitação do período de 2003 a 2019

para as ottobacias de nível 5 do bioma Cerrado. As ottobacias são as bacias e interbacias codificadas a partir de uma estrutura hierárquica da rede de drenagem (PFAFSTETTER, 1989), metodologia esta considerada a oficial de codificação de bacias hidrográficas do Brasil (ANA, 2012).

A HydroCerrado disponibiliza dados para um total de 4.538 ottobacias no Cerrado, sendo que a vazão diária foi obtida pelo modelo hidrológico GR5J calibrado com dados de 411 estações fluviométricas do bioma, e a precipitação, corresponde ao produto Integrated Multisatellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) (HUFFMAN et al., 2019). Vale destacar que a unidade da vazão da base de dados HydroCerrado é expressa em mm dia^{-1} , obtida para facilitar a comparação direta com a precipitação e a ETo, que são expressas em mm. A conversão da unidade da vazão para mm dia^{-1} foi realizada partir do volume de água escoado por unidade de área da bacia, conforme descrito por Althoff et al. (2022).

Além disso, foi obtido para o presente estudo os mapeamentos da irrigação e do uso e cobertura da terra do Cerrado para os anos 2003, 2007, 2011, 2015 e 2019 (MAPBIOMAS, 2024).

2.3 Análise de tendência da precipitação e vazão

A análise de tendência foi realizada para o período de 2003 a 2019 das séries mensais e anuais da precipitação total (P_t), vazão mínima de sete dias de duração (Q_7), vazão média diária (Q_{mean}) e vazão máxima diária (Q_{max}). Na análise anual foi considerado o ano hidrológico, com início em outubro e término em setembro, para cada uma das ottobacias do Cerrado.

Inicialmente, foi aplicado o teste Run (THOM, 1966) para avaliar a aleatoriedade das séries mensais e anuais. Em seguida, foi aplicado o teste Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para avaliar se as séries de dados de vazão e precipitação apresentavam uma tendência de mudança temporal estatisticamente significativa, e se essa tendência era crescente ou decrescente. Posteriormente, foi obtido Estimador de Declive de Sen (Sen's Slope) (SEN, 1968) para avaliar a magnitude dessas tendências significativas. E, por último, foi aplicado o teste de Pettitt (PETTITT, 1979) para identificar o ano de mudança daquelas séries que foram consideradas não estacionárias. Vale ressaltar que os testes de Mann Kendall, Sen's Slope e Pettitt foram aplicados considerando um nível de significância de 5%, conforme sugerido por Mudbhatkal et al. (2017).

Os cálculos relacionados aos testes Run, Man-Kendall, Sen's Slope e Pettitt foram realizados no software R (R CORE TEAM, 2023), utilizando os pacotes randtests, Kendall e

trend.

3. Resultados e discussões

3.1 Tendências das séries mensais e anuais da precipitação e vazão das bacias hidrográficas do Cerrado

Os resultados da aplicação do teste Run nas séries mensais e anuais dos dados temporais da P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} das ottobacias do Cerrado indicaram que todas essas séries são independentes e aleatórias.

Nas Figuras 2, 3, 4 e 5 são apresentadas as distribuições espaciais das ottobacias que apresentaram tendências significativas nas séries mensais e anuais da P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} , respectivamente. Nestas figuras as ottobacias que apresentaram um comportamento estacionário estão em branco, e as ottobacias que apresentaram um comportamento não estacionário, ou seja, uma tendência significativa nas séries mensais e anuais da P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} , estão em tons de azul (aumento) ou em tons de vermelho (diminuição).

As séries de dados anuais da P_t (Figura 2) resultaram em 8 ottobacias com tendência crescente e 898 ottobacias com tendência decrescente, sendo que estas ocupam em sua maioria porções dos Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e Distrito Federal, e com magnitudes de redução, a cada ano, superiores a 20 mm. Já as séries de dados mensais da P_t apresentaram ottobacias com tendências significativas decrescentes em todos os meses, exceto setembro, e tendências significativas crescentes de março a novembro. Contudo, as maiores concentrações de ottobacias com tendências significativas foram decrescentes e ocorreram nos meses de janeiro e dezembro, tendo em sua maioria magnitudes de redução entre 5 e 15 mm a cada mês, ocorrendo principalmente na porção sudeste do bioma.

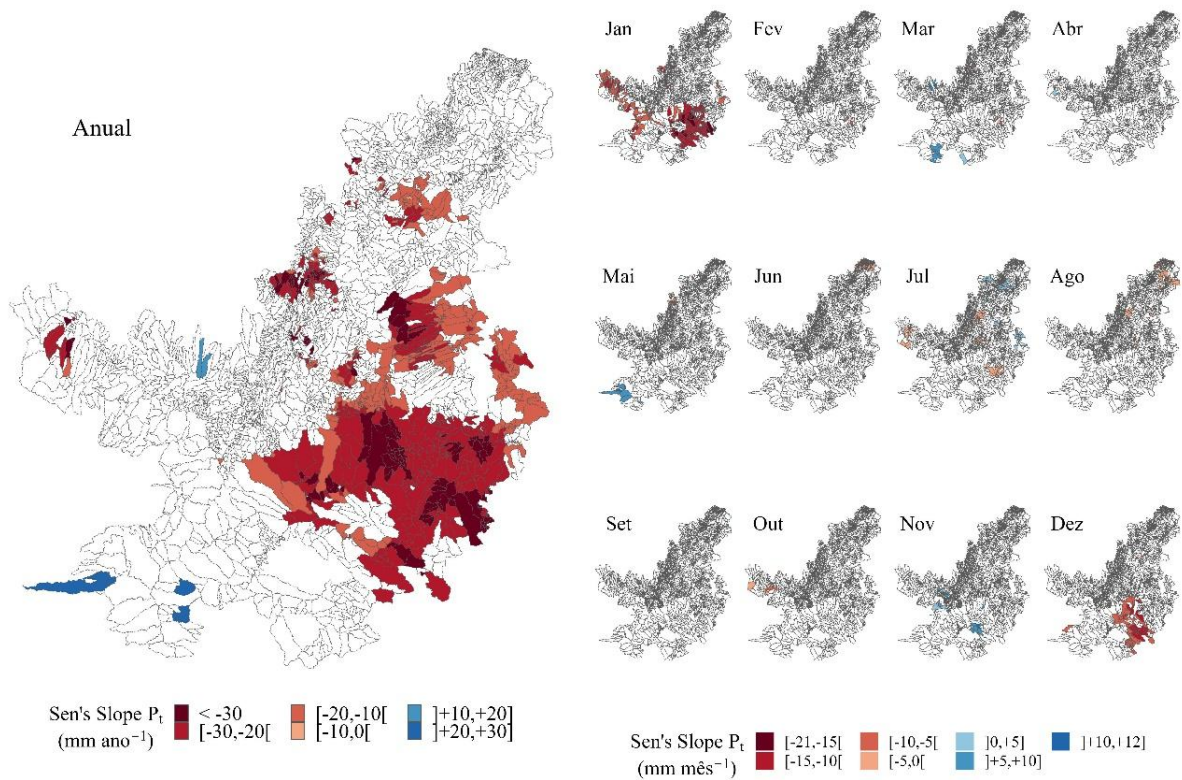


Figura 2. Distribuição espacial das tendências para a precipitação total (P_t) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope)

A localização dessas otobacias com tendências significativas corroboram com estudos de tendências das chuvas no Cerrado (CHAGAS; CHAFFE, 2019; CAMPOS; CHAVES, 2020; HOFMANN et al., 2023). Chagas e Chaffe (2019) analisaram as tendências de precipitação no Brasil do período de 1980 a 2015 e detectaram uma redução significativa da precipitação média anual na região sudeste do país e no Cerrado. Os mesmos autores ainda destacam o aumento da duração dos períodos secos, sendo as bacias hidrográficas dos rios São Francisco e Tocantins-Araguaia as mais afetadas por esse aumento da frequência de eventos extremos.

Essa redução das chuvas em meses tipicamente chuvosos, como janeiro e dezembro, parece ser a maior influência na diminuição dos totais anuais no Cerrado, e reforçam o aumento de dias de seca no bioma. Campos e Chaves (2020) detectaram uma redução das precipitações em meses chuvosos, atribuindo essa alteração ao enfraquecimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), tanto na intensidade como na frequência desse evento climático que é responsável por trazer chuvas para as regiões centro-oeste e sudeste do Brasil. Já Hofmann et al. (2023) atribuíram a redução significativa da frequência de dias chuvosos e da precipitação

anual no Cerrado não só às alterações climáticas, mas também ao desmatamento e à conversão de áreas de vegetação em lavouras e pastagens, que impactam diretamente na umidade do bioma. Além disso, os mesmos autores identificaram tendências decrescentes significativas para a evapotranspiração, contribuindo potencialmente para a diminuição das chuvas no Cerrado.

Sabendo que a precipitação é uma variável importante para a recarga dos aquíferos, foi observado que muitas das ottobacias que apresentaram tendências significativas decrescentes na série anual da P_t também apresentaram tendências significativas decrescentes nas três séries de vazão analisadas.

Na análise anual da Q_7 (Figura 3), vazão utilizada para fins de estimativa da $Q_{7,10}$ (vazão mínima de referência com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos), adotada como referência para outorga de uso de água em alguns estados do Brasil, de um total de 1.649 ottobacias com comportamento não estacionário, 56 são crescentes e 1.593 são decrescentes, tendo bastante ottobacias dos Estados de Minas Gerais, Goiás, Tocantins, Bahia, Piauí, Maranhão e Distrito Federal, e magnitudes de redução concentradas entre 0 e 0,01 mm dia¹ a cada ano. Com espacialização semelhante à Q_7 anual, as análises mensais da Q_7 mostraram uma quantidade expressiva de ottobacias com tendências significativas de decréscimo em todos os meses, reforçando a redução da disponibilidade hídrica em várias partes do Cerrado, mesmo em períodos normalmente chuvosos.

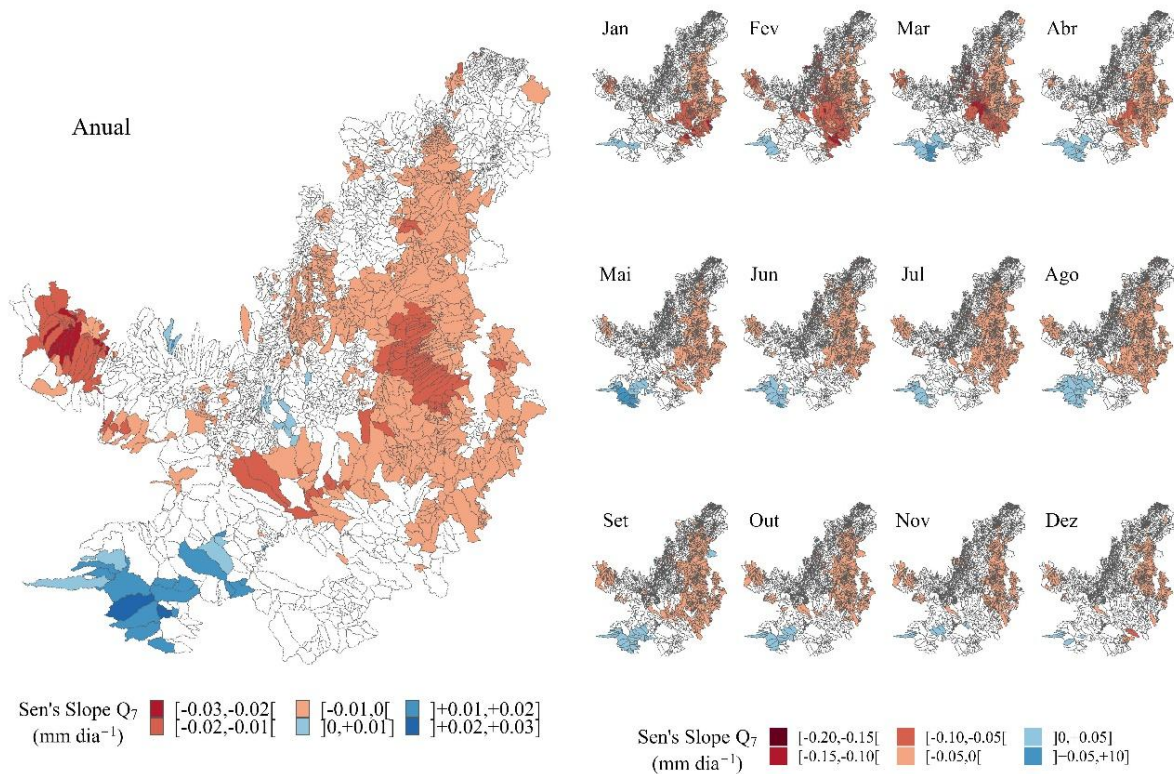


Figura 3. Distribuição espacial das tendências para a vazão mínima (Q_7) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) para as séries anual e mensal da Q_7 .

Já na análise anual da Q_{mean} (Figura 4), que reflete a disponibilidade hídrica das ottobacias ao longo do ano, mais da metade das ottobacias apresentaram tendência decrescente, com um total de 2.566, localizadas principalmente nos Estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Bahia, Tocantins, Piauí, Maranhão e o Distrito Federal, e apenas 25 ottobacias com tendência crescente. As magnitudes de redução a cada ano da Q_{mean} estão mais concentradas entre os valores 0 e 0,05 mm dia⁻¹. Nas séries de dados mensais da Q_{mean} , as ottobacias com tendências significativas decrescentes tiveram maiores valores e concentrações nos meses de janeiro a março, principalmente nas porções leste, sudeste e oeste do Cerrado, e tendências significativas crescentes em ottobacias na porção sudoeste do bioma, ocorrendo até um aumento das vazões em algumas dessas ottobacias durante a estação seca.

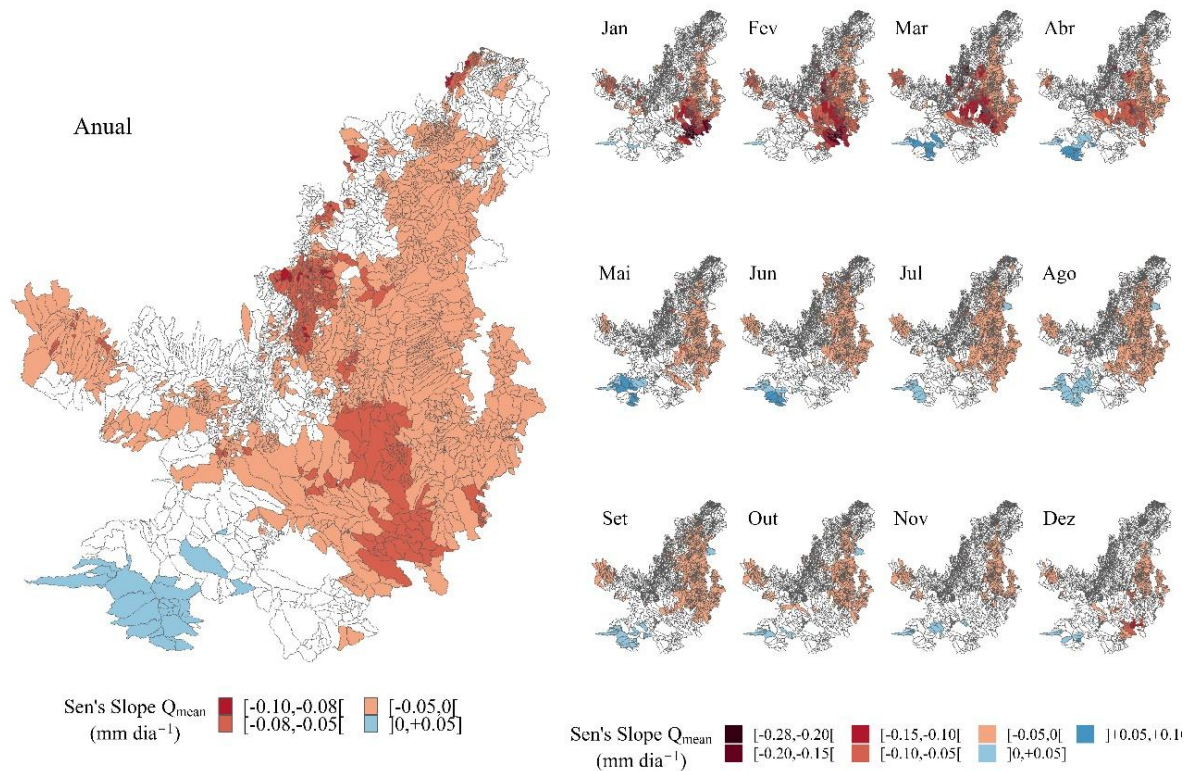


Figura 4. Distribuição espacial das tendências para a vazão média (Q_{mean}) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) para as séries anual e mensal da Q_{mean} .

A presença de otobacias da porção leste do Cerrado com tendências significativas de redução das vazões mínimas e médias nas séries mensais e anuais chama atenção, pois essa região é caracterizada pelo clima semiárido e transição com o bioma Caatinga, além de possuir Estados que integram a fronteira agrícola MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), região caracterizada pela agricultura intensiva e rápida mudança nos usos e coberturas da terra verificadas nos últimos anos (POUSA et al., 2019; VIEIRA et al., 2021).

Da mesma maneira, preocupa o fato de se verificar otobacias com tendências de redução das vazões na porção sudeste do Cerrado, que é a porção mais urbanizada, de maior concentração de áreas irrigáveis, e onde já são observadas áreas com conflitos pelo uso da água (POUSA et al., 2019; SANO et al., 2024). A exemplo, a bacia hidrográfica do rio Paracatu, umas das principais do Cerrado, afluente do rio São Francisco e localizada na porção noroeste do Estado de Minas Gerais, enfrenta crescentes desafios relacionados a disponibilidade hídrica. Silva et al. (2020) e Ferreira et al. (2025) destacam a intensificação da agricultura na bacia do

Paracatu, sendo umas das maiores expansões de áreas irrigáveis do Brasil, principalmente pelo sistema pivô central. Além da intensificação da irrigação, a bacia do Paracatu também enfrenta o impacto de outras atividades antrópicas, como o crescimento populacional e construções de infraestruturas urbanas, que afetam diretamente a demanda hídrica da região, e quando essa demanda coincide com os períodos de estiagem resultam em uma diminuição crítica das vazões mínimas e médias da bacia (PRUSKI et al.,2007; TEIXEIRA et al., 2021).

No que diz respeito às tendências da Q_{\max} (Figura 5), que representa os riscos de enchentes/inundações, a localização das otobacias com tendências significativas são semelhantes às de Q_{mean} , tendo na análise anual 2.312 otobacias com tendência significativa decrescente e apenas 12 com tendência significativa crescente, sendo que estas podem estar associadas a eventos mais intensos de precipitação na porção sudoeste do Cerrado, como verificado pelas tendências crescentes da P_t mensal e anual nessa região, resultando em elevadas taxas de escoamento superficial e, conseqüentemente, maiores riscos de enchentes.

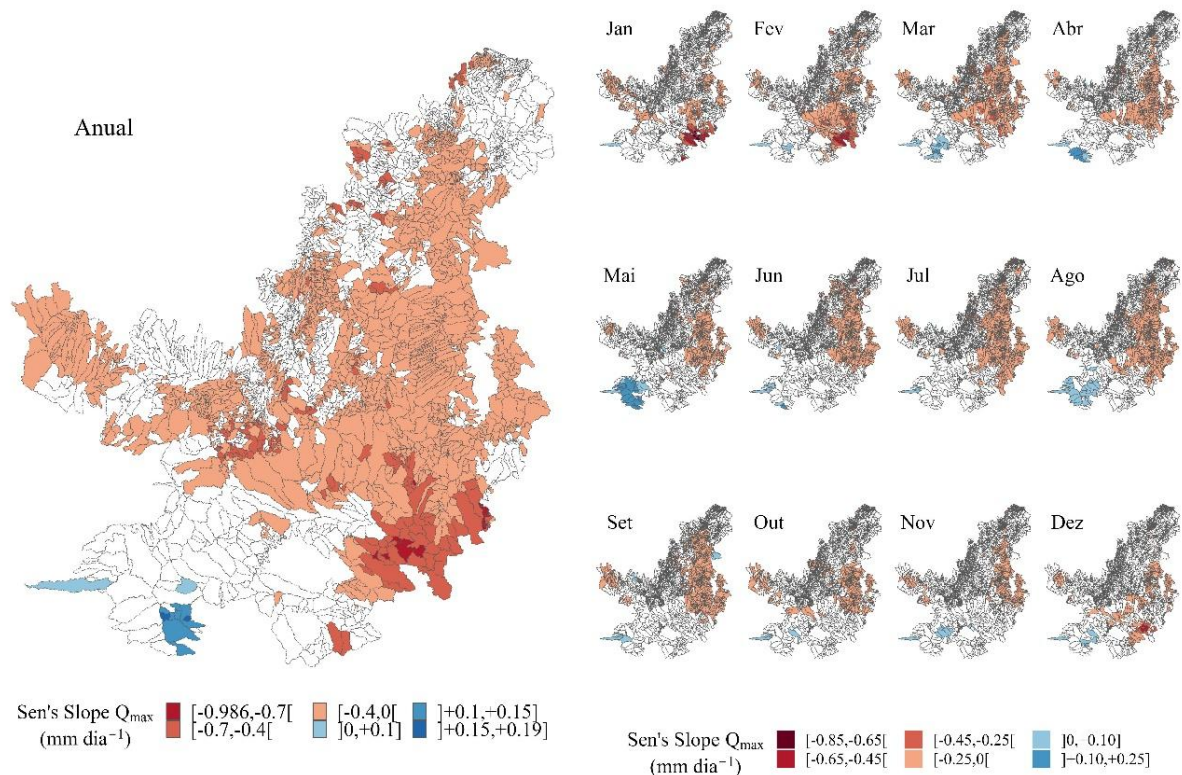


Figura 5. Distribuição espacial das tendências para a vazão máxima (Q_{\max}) anual e mensal: aumento (tons de azul), diminuição (tons de vermelho) e sem tendência significativa (em branco), e os intervalos da magnitude dessas tendências (Sen's Slope) para as séries anual e mensal da Q_{\max} .

Apesar da diminuição das vazões máximas em diversas ottobacias do Cerrado, com uma taxa de variação das magnitudes entre 0 e $0,4 \text{ mm dia}^{-1}$ a cada ano, esse comportamento pode ser preocupante para a dinâmica dos corpos d'água. Segundo Poff et al. (1997), durante os eventos de cheia, os leitos dos rios, lagos e lagoas são renovados pela dispersão e transporte de nutrientes e sedimentos, além de proporcionar a manutenção de ecossistemas mais úmidos, como várzeas e margens dos corpos d'água. Assim, a redução das vazões máximas pode gerar impactos consideráveis, como já é observado no Cerrado, onde muitos rios apresentam baixa capacidade de condução devido ao acúmulo de sedimentos, resultado das mudanças no uso e cobertura da terra, principalmente pelo aumento de áreas desmatadas e de uso agrícola (PELICICE et al., 2021; PEREIRA et al., 2024).

Tem-se como exemplo as bacias hidrográficas do Araguaia e Tocantins, localizadas nas porções oeste e central do Cerrado, que exercem importantes funções na manutenção dos ecossistemas locais devido a sua extensão e vasta presença de várzeas, além de desempenharem atividades para o abastecimento humano e geração de energia (PELICICE et al., 2021; CHAMON et al., 2022). Entretanto, estudos recentes indicam uma tendência de redução das vazões máximas das bacias do Araguaia e Tocantins, o que pode estar associado às mudanças de uso e cobertura da terra, como o aumento do assoreamento dos rios (PELICICE et al., 2021; PEREIRA et al., 2024), o que compromete diretamente na capacidade de renovação e transporte dos rios de maneira eficiente.

De modo geral, os resultados das séries Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} para as ottobacias do Cerrado apresentam comportamentos semelhantes, no sentido de que as ottobacias que apresentaram redução na vazão máxima também apresentaram, em sua maioria, redução nas vazões mínimas e médias. Esses resultados corroboram com os achados de Souza e Reis Júnior (2022), que analisaram tendências de vazões extremas para diversas variáveis hidrológicas, incluindo Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} , e detectaram que existe um padrão de tendências decrescentes ocorrendo em todas as regiões hidrográficas do Brasil, exceto no Amazonas, onde tem-se incertezas devido à baixa proporção de estações com dados significativos (séries temporais com mais de 30 anos). Quanto às estações com tendências significativas, Souza e Reis Júnior (2022) verificaram que as séries Q_7 e Q_{mean} tem uma predominância de tendências decrescentes nas regiões hidrográficas do São Francisco, Parnaíba, Tocantins-Araguaia e Atlântico Leste, regiões que em partes integram o Cerrado, e tendências crescentes ocorrendo nas regiões do Uruguai e Atlântico Sul. Já para a Q_{max} , Já Souza e Reis Júnior (2022) observaram uma maior concentração das tendências significativas decrescentes nas regiões hidrográficas do São Francisco e Atlântico Leste, e

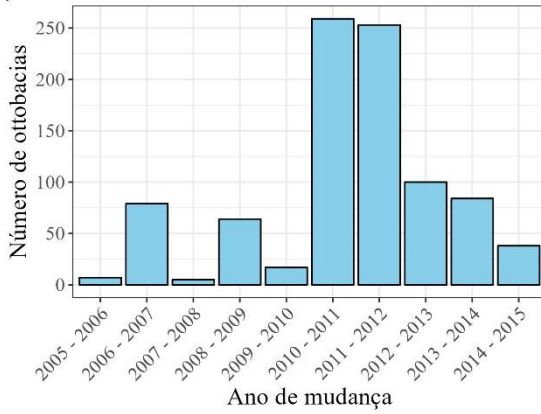
regiões com maior concentração de tendências positivas no Amazonas e Paraná.

3.2 Avaliação dos efeitos climáticos e do uso e cobertura da terra nos regimes pluviais e fluviais das bacias hidrográficas do Cerrado

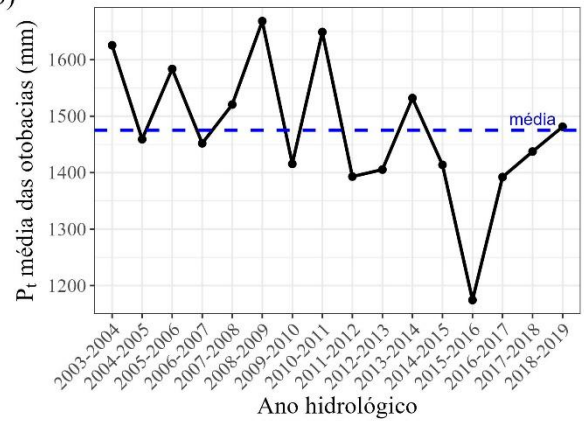
As mudanças verificadas nos regimes da precipitação e vazão em diversas ottobacias do Cerrado pode ser explicada por uma combinação de fatores climáticos e antrópicos que ocorrem no bioma, e os períodos apontados como de mudanças no comportamento não estacionário dessas séries podem contribuir para uma melhor análise desses fatores.

Na Figuras 6a, 6c, 6e e 6g são apresentados, respectivamente, os números de ottobacias e o ano hidrológico correspondente às mudanças das séries de P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} identificados pelo teste de Pettitt, e nas Figuras 6b, 6d, 6f e 6h são apresentadas, respectivamente, as médias anuais das ottobacias ao longo do período para as séries de P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} .

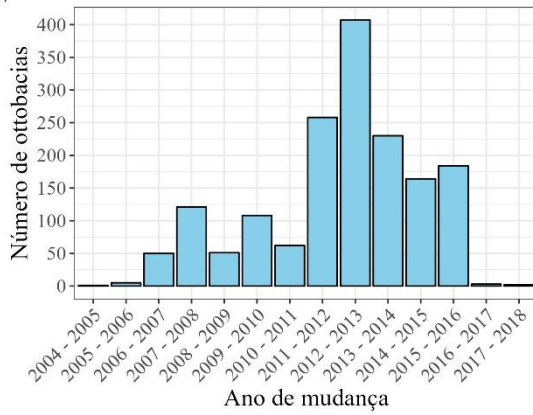
a) P_t



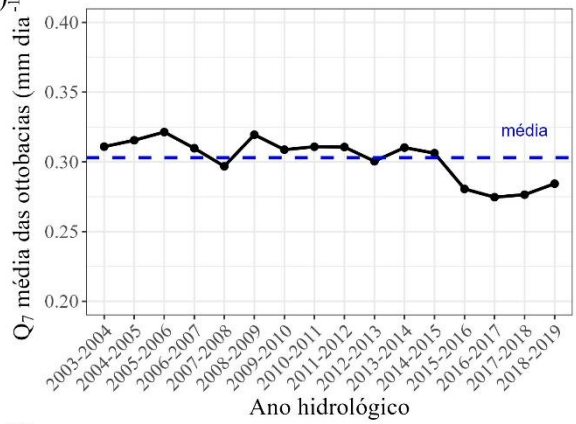
b)



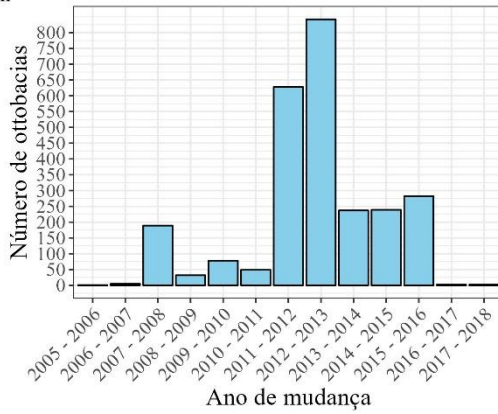
c) Q_7



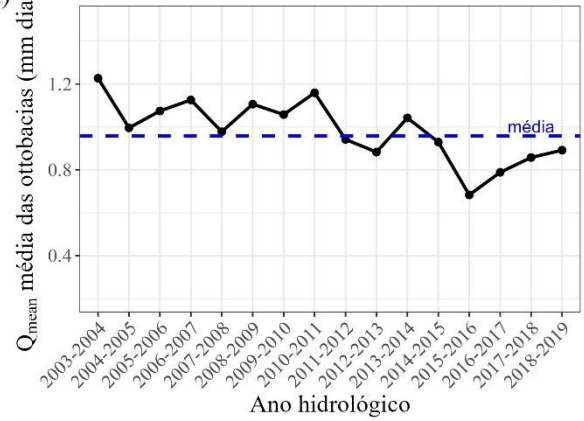
d)



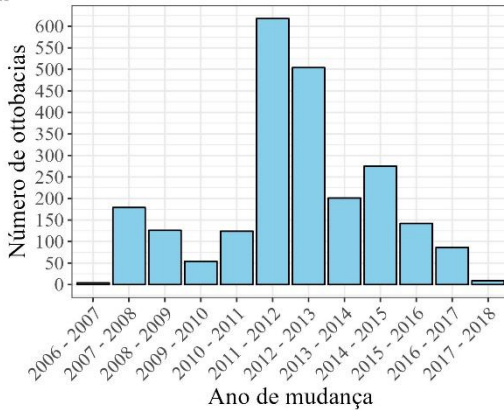
e) Q_{mean}



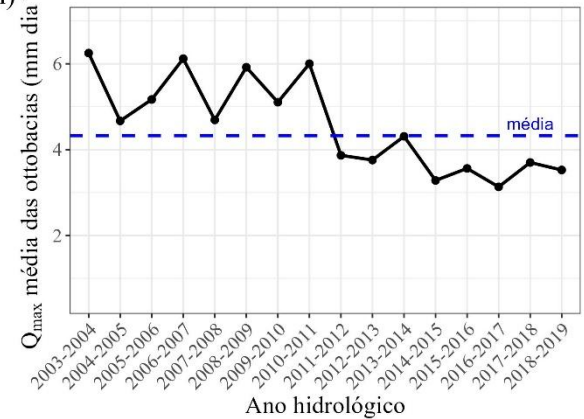
f)



g) Q_{max}



h)



P_t = precipitação total; Q_7 = vazão mínima de 7 dias de duração; Q_{mean} = vazão média; Q_{max} = vazão máxima

Figura 6. Número de ottobacias e ano de mudança das séries (a) P_t , (c) Q_7 , (e) Q_{mean} e (g) Q_{max} identificado pelo teste de Pettitt e médias anuais das ottobacias para as séries de (b) P_t , (d) Q_7 , (f) Q_{mean} e (h) Q_{max} .

Em todos os resultados obtidos pelo teste de Pettitt, observa-se uma concentração dos anos de mudanças para cada série analisada, sendo o período de 2010 a 2012 os mais críticos quando se trata da P_t , pois foi onde ocorreram o maior número de ottobacias com mudanças significativas em seus regimes pluviais. Com base na série da P_t , esse período apresentou o ano hidrológico 2010-2011 chuvoso, com uma média de 1.649 mm, seguido de um dos anos mais secos no Cerrado, 2011-2012, com média de 1.393 mm, sendo que média anual dessas ottobacias é de 1.475 mm (Figura 6a).

Correia Filho et al. (2021) também destacam o ano de 2012 como um dos mais secos no Cerrado, evidenciando a influência de eventos climáticos na variabilidade das chuvas no bioma, como a ZCAS e o El Niño-Oscilação do Sul (ENOS). Segundo os autores, entre 1985 e 2020 o Cerrado apresentou diversas anomalias nos totais de precipitação, sendo que em anos mais secos as porções central, leste, sudeste e norte do Cerrado apresentaram anomalias negativas (redução das chuvas), enquanto as porções sul e sudoeste apresentaram anomalias positivas (aumento das chuvas). Já nos anos mais chuvosos, houve o comportamento inverso, tendo todas essas anomalias fortemente influenciadas pelas fases do ENOS.

Reboita e Ferreira (2024) indicam a ZCAS como o principal sistema atmosférico responsável pelas chuvas no Cerrado durante a estação chuvosa, e o seu fortalecimento ou enfraquecimento decorre da atuação concomitante de diferentes modos de variabilidade climática, como o fenômeno ENOS. A fase quente do ENOS, o El Niño, provoca a redução das chuvas no Brasil, principalmente nas regiões norte, nordeste e parte do centro-oeste do país, sendo estas frequentemente associadas às secas mais intensas (CORREIA FILHO et al., 2019; MARENGO et al., 2022). Esse evento pode ser um dos agravantes da tendência decrescente das chuvas das ottobacias nas porções leste e norte do Cerrado, especialmente durante o ano 2015/2016, período de forte intensidade do El Niño (NOAA/CPC, 2024), fazendo desse ano o de menor total precipitado (1.174 mm) da série média das ottobacias (Figura 6b).

Por outro lado, os eventos da fase fria do ENOS, La Niña, promovem um aumento das chuvas no Brasil, principalmente nas regiões norte e nordeste do país (CIRINO et al., 2015). Entre os anos de 2010 e 2012 teve a ocorrência do evento La Niña, sendo que em 2010-2011 esse evento apresentou uma escala forte de intensidade (NOAA/CPC, 2024), o que resultou em um dos anos com maiores totais precipitados para as ottobacias, com média de 1.633 mm. Já

no ano seguinte, La Niña foi moderada, e segundo Correia Filho et al. (2021), ela foi dissipada antes do início da estação seca no Cerrado, o que conferiu anomalias negativas nas porções central, leste e norte do bioma, e um dos anos de maiores estiagens de chuvas identificadas no Cerrado, corroborando com o baixo total precipitado nesse período para as ottobacias, com média de 1.393 mm.

O impacto desses eventos climáticos no Cerrado durante o período de estudo pode ser visto também nos regimes de vazões, pois o período de maior concentração de mudanças significativas para a Q_7 foi em 2013-2014, ano que sucede o período da longa estiagem no Cerrado, além de um considerável número de ottobacias com pontos de mudanças no ano anterior e nos anos posteriores até 2016. Quanto aos valores de Q_{mean} e Q_{max} , a maioria das ottobacias tiveram seus anos de mudanças ocorrendo entre 2012 e 2014. A redução e variação das precipitações durante esse período pode ter influenciado o regime médio e de cheias dessas ottobacias.

De um modo geral, os anos de 2009 a 2014 foram os mais críticos para as diferentes variáveis hidrológicas analisadas, indicando uma influência climática, principalmente pelos eventos extremos de seca. Além desse padrão sugerir as alterações climáticas, as pressões antrópicas podem ter desempenhado um importante papel no comportamento das ottobacias analisadas.

Na Figura 7 são apresentadas as distribuições espaciais das classes de uso e cobertura da terra no Cerrado nos anos 2003, 2007, 2011, 2015 e 2019, e as porcentagens gerais dessas classes ao longo do tempo.

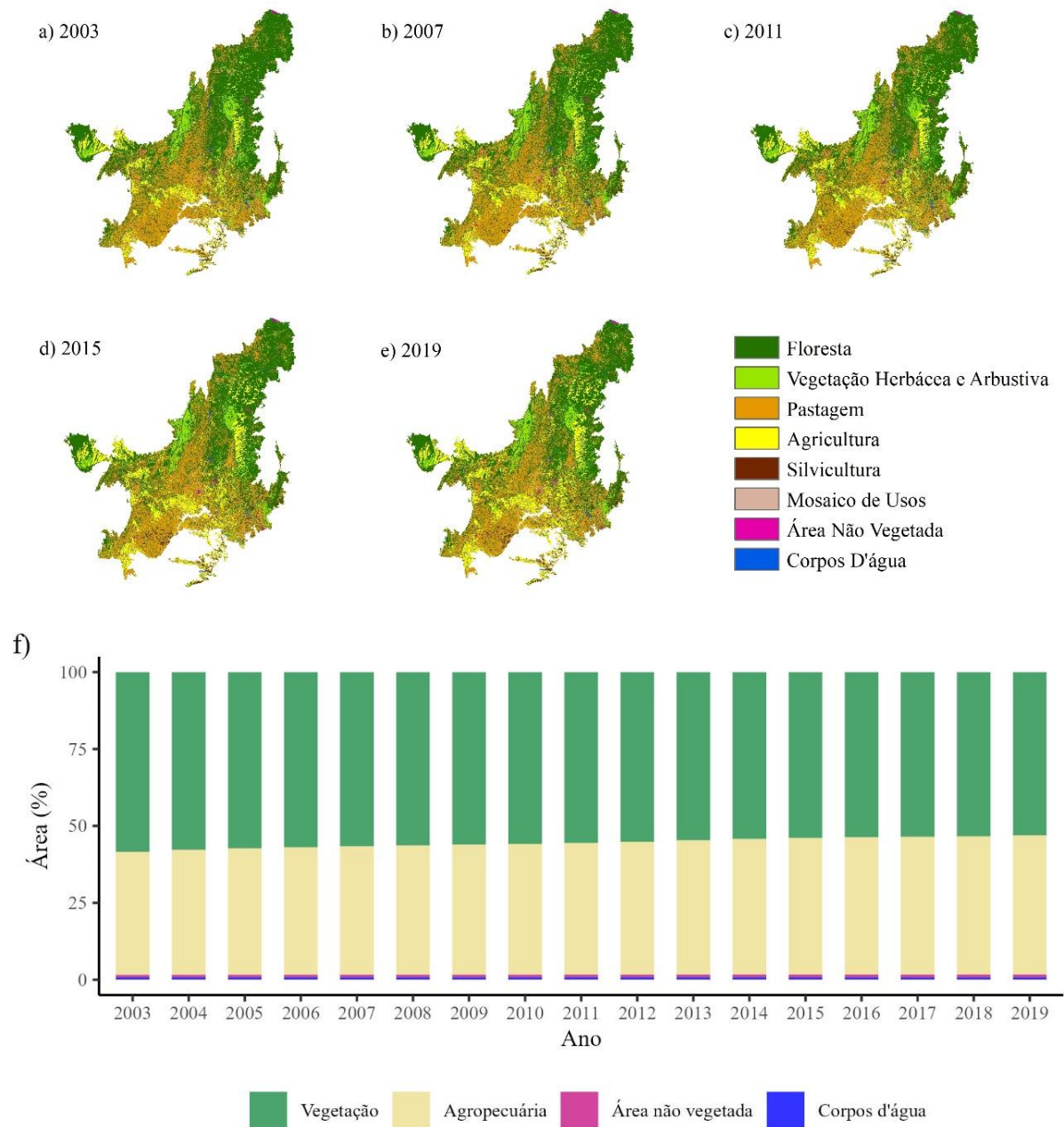


Figura 7. Mapas de uso e cobertura da terra do Cerrado nos anos de (a) 2003, (b) 2007, (c) 2011, (d) 2015 e (e) 2019, e as (f) porcentagens gerais das classes no período de 2003 e 2019.

Fonte: MapBiomias (2024).

Na Figura 7 pode-se observar que a classe de vegetação representada pelas florestas e vegetação herbácea e arbustiva tem a maior porcentagem ao longo do período em análise, variando entre 53 e 59% da área do Cerrado, entretanto, é possível observar a sua redução em decorrência do aumento das áreas agropecuárias, que incluem atividades de pastagem, agricultura, silvicultura e mosaico desses usos.

Durante o período de 2003 a 2019 as áreas agropecuárias aumentaram em 13,2%, totalizando quase 105 mil km² e chegando a representar 45% da área do Cerrado em 2019, localizadas principalmente nas porções central, sudeste e sudoeste do bioma. Em contrapartida, as áreas de vegetação tiveram uma diminuição de 9,2%, o equivalente a 107 mil km², convertidas principalmente para a pastagem e agricultura, comportamento este também verificado por Colman et al. (2024) e Pompeu et al. (2024) para o Cerrado.

Essa conversão pode ser observada em todas as porções do Cerrado, o que pode trazer diversos impactos na dinâmica hidrológica regional. Como por exemplo, a retirada da vegetação natural que pode implicar na redução da infiltração de água no solo, diminuindo a recarga dos aquíferos e aumentando o escoamento superficial, levando a uma maior suscetibilidade dessas áreas a enchentes e uma menor capacidade de retenção da água durante os períodos de seca (NÓBREGA et al., 2017). Além disso, a expansão da agropecuária pode contribuir para o aumento da demanda hídrica e piorar a qualidade da água, devido ao uso extensivo de fertilizantes e pesticidas, que contribuem para a contaminação dos corpos d'água, acarretando também a perda da biodiversidade (NAKAWAGA et al., 2019).

No Cerrado, os impactos das mudanças de uso e cobertura da terra já são observados na disponibilidade hídrica em diversas porções do bioma (SIQUEIRA et al., 2021; SALMONA et al., 2024). Para uma melhor análise, na Tabela 1 são apresentados os coeficientes de correlação de Spearman entre os valores médios anuais das vazões Q_7 e Q_{mean} para o Cerrado e as classes de uso e cobertura da terra do Cerrado considerando o período de 2003 a 2019.

Tabela 1. Coeficiente de Spearman entre as vazões Q_7 e Q_{mean} e as classes de uso e cobertura da terra

Classes	Q_7		Q_{mean}	
	Spearman	p-valor	Spearman	p-valor
Vegetação nativa	0,78	0,0007	0,78	0,0007
Agropecuária	-0,78	0,0007	-0,78	0,0007
Área não vegetada	-0,66	0,008	-0,83	0,0002

A correlação positiva entre a vegetação nativa e as vazões mínima e média indicam que quanto maior a cobertura do solo por vegetação nativa, maior tende a ser essas vazões. Em contraste, foram observadas correlações negativas entre as áreas não vegetadas e as Q_7 e Q_{mean} ,

sugerindo que a ausência de cobertura vegetal pode comprometer a disponibilidade hídrica ao longo do tempo. Da mesma maneira, as áreas agropecuárias também apresentaram correlação negativa, indicando que a expansão dessas atividades pode diminuir as Q_7 e Q_{mean} no bioma, provavelmente provocado pelo aumento da demanda hídrica para a irrigação e à conversão das áreas vegetadas em agrícolas.

Associada à expansão das atividades agropecuárias no Cerrado tem-se a intensificação das áreas irrigáveis no bioma. Embora essencial para a produtividade agrícola, essa atividade pode impor pressões adicionais sobre os recursos hídricos da região se realizada de forma não sustentável.

Para ilustrar a expansão da irrigação no Cerrado e os impactos sobre os regimes de vazão, um mapa temporal da irrigação no bioma foi elaborado considerando intervalos de 4 em 4 anos para o período de análise 2003-2019 (Figura 8).

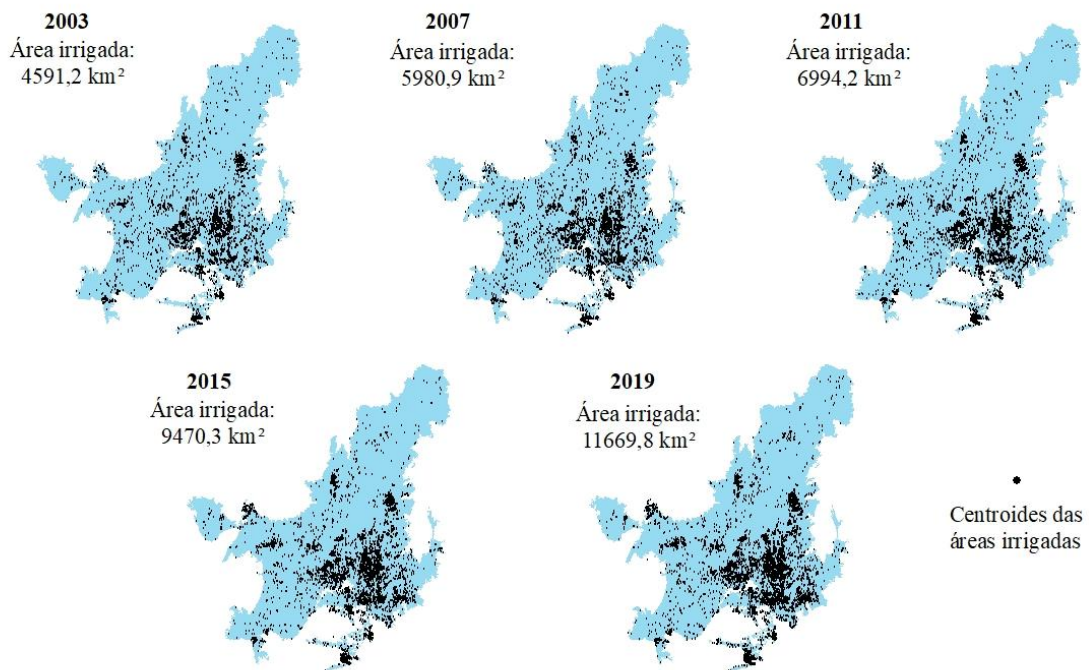


Figura 8. Evolução das áreas irrigadas no Cerrado considerando os anos de 2003, 2007, 2011, 2015 e 2019.

Fonte: MapBiomias (2024)

A expansão das áreas irrigadas no Cerrado apresentou expressivo crescimento ao longo do período analisado. Em 2003, as áreas irrigadas totalizavam 4.591,2 km², enquanto em 2019 esse valor aumentou em aproximadamente 155%, com maior intensidade em algumas regiões, como por exemplo, a bacia hidrográfica do rio Paracatu. O crescimento mais expressivo ocorreu

entre 2011 e 2015, com um aumento de 35,4% da área irrigada, o que pode ter impactado os regimes das vazões Q_7 e Q_{mean} , tendo em vista que foi durante esse período que a maioria das ottobacias do bioma apresentaram mudança de comportamento hidrológico, conforme indicado pelo teste de Pettitt (Figuras 6c, 6e e 6g).

Além disso, observa-se que, em todos os anos analisados, a maior concentração de áreas irrigadas está nas porções sudeste, leste e central do Cerrado, principalmente nos Estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia, regiões estas de maiores concentrações de ottobacias com tendências de redução dos regimes de chuva e vazão mensais e anuais (Figuras 2, 3, 4 e 5). Quando observadas as magnitudes de redução a cada ano desses regimes obtidos pelo estimador Sen's Slope, verifica-se que as ottobacias dessas regiões apresentam valores em torno de 0 a $0,02 \text{ mm dia}^{-1}$ para a vazão mínima, 0 a $0,08 \text{ mm dia}^{-1}$ para a vazão média e 0 a $0,9 \text{ mm dia}^{-1}$ para a vazão máxima. Já para a precipitação total, as variações de redução a cada a ano estão entre 0 e 30 mm. Esses padrões reforçam a influência da intensificação da irrigação sobre os regimes de vazão, ressaltando a necessidade de estratégias de gestão sustentável nessas regiões.

3.3 Análise integrada: implicações no Cerrado

As tendências hidrológicas verificadas neste estudo refletem padrões que variam entre as regiões do Cerrado, mostrando tanto a influência inerente da variabilidade climática quanto os impactos das mudanças do clima e das atividades antrópicas no bioma. Regiões com tendências significativas de redução nas precipitações e vazões, associadas ao aumento das atividades agropecuárias, principalmente das atividades de irrigação, demandam maior atenção para a gestão dos recursos hídricos.

Por exemplo, o município de Barreiras (Bahia), localizado na transição Cerrado-Caatinga e na fronteira agrícola MATOPIBA, apresentou tendências negativas em todas as séries analisadas, P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} anuais e mensais, ou seja, estratégias de manejo sustentável são necessárias para evitar o estresse hídrico em uma área de grande importância econômica e ambiental.

De forma semelhante, o município de Paracatu (MG), localizado na bacia do rio Paracatu, apresenta uma alta demanda hídrica para irrigação, que combinada às mudanças climáticas, como o aumento dos dias de seca para essa região, e às tendências significativas de redução verificadas para P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} ao longo de todo o ano, tornam essa região particularmente vulnerável, exigindo esforços para mitigar os riscos aos recursos hídricos locais junto a uma agricultura mais sustentável.

Já o município de Tangará da Serra (MT), localizado entre a transição do Cerrado e a

Amazônia e com forte presença de agricultura intensiva e gado para corte, não apresentou tendências de redução significativas para as precipitações, exceto para os meses de janeiro e outubro. Contudo, foram verificadas tendências significativas de redução para Q_7 e Q_{mean} nas análises anual e mensal. Esse padrão pode estar relacionado à conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas, conforme observado pela evolução dos mapas de uso e cobertura da terra do Cerrado, o que pode comprometer a manutenção dos serviços ecossistêmicos, a recarga e a disponibilidade hídrica, sendo que a região já apresentou conflitos pelo uso da água (ANDRADE; GRZEBIELUCKAS, 2021).

Diante desse cenário, é crucial a implementação de políticas públicas que incentivem a adoção de práticas de manejo sustentável, tais como a irrigação eficiente, uso racional de insumos, agroflorestas, integração Lavoura-Pecuária-Floresta, rotação de culturas, conservação da vegetação nativa, entre outros. Assim, a mitigação dos efeitos climáticos e de mudanças de uso e cobertura da terra tornará equilibrada, principalmente entre a expansão agropecuária e a conservação dos recursos hídricos e ambientais no Cerrado.

4. Conclusões

Os resultados deste estudo identificaram mudanças expressivas nos regimes de precipitação e vazão em diversas bacias hidrográficas do Cerrado, com predominância de tendências decrescentes, principalmente nas porções central, leste, oeste e sudeste do bioma. A análise de tendência permitiu também verificar que essas mudanças não ocorreram de maneira isolada, mas sim como resultado da interação entre variabilidade climática, mudanças no clima e alterações no uso e cobertura da terra, evidenciando a complexidade desses fatores no ciclo hidrológico do Cerrado.

Analisando os meses chuvosos, como janeiro e dezembro, observou-se tendência de redução na P_t mensal, sugerindo uma intensificação dos períodos de seca, principalmente nas porções leste e sudeste do bioma. Nessas mesmas áreas do Cerrado, foram observadas tendências de redução na P_t anual, refletindo não apenas os efeitos das mudanças climáticas, mas também a conversão de áreas de vegetação nativa em áreas agropecuárias, que pode impactar diretamente a umidade e os totais precipitados no bioma.

No geral, as bacias hidrográficas que apresentaram tendências decrescentes na série anual da P_t também apresentaram tendências decrescentes nas três séries de vazão analisadas. As tendências decrescentes da Q_7 e Q_{mean} indicaram uma redução na disponibilidade hídrica em muitas bacias hidrográficas do Cerrado, principalmente nas porções central, leste, sudeste e oeste. A análise mensal reforçou esse padrão, indicando que a Q_7 apresentou bacias com

tendência decrescente em todos os meses do ano, enquanto a Q_{mean} teve janeiro a março como os períodos mais críticos em termos de volumes reduzidos.

A predominância de bacias hidrográficas com tendências decrescentes nas séries da Q_7 e Q_{mean} nas porções leste, região de transição com a Caatinga e integrante da fronteira agrícola MATOPIBA, e sudeste, região mais urbanizada e com maior concentração de áreas irrigáveis do bioma, chama a atenção, reforçando a necessidade de uma gestão hídrica mais estratégica nessas regiões. Esse cenário se torna ainda mais preocupante quando considerado o crescimento expressivo da agricultura irrigada verificado nessas porções no Cerrado.

Em relação a Q_{max} , também foi observada uma predominância de tendências decrescentes, principalmente nas porções central, leste, sudeste e oeste do Cerrado. Embora a redução da Q_{max} possa sugerir uma diminuição dos riscos de inundações, esse comportamento pode refletir um comprometimento na capacidade de transporte de sedimentos e nutrientes, alterando a dinâmica dos corpos d'água e impactando a qualidade da água e manutenção dos ecossistemas aquáticos.

Os anos identificados como pontos de mudança nas séries temporais da P_t , Q_7 , Q_{mean} e Q_{max} das bacias hidrográficas tiveram maiores concentrações entre 2009 e 2014, períodos coincidentes com eventos climáticos extremos, como El Niño e La Niña, e mudanças rápidas no uso e cobertura da terra. Esse período foi marcado por secas severas e pela conversão intensiva de áreas de vegetação nativa em agropecuária, o que pode ter intensificado os impactos hidrológicos desses regimes. Além disso, as alterações climáticas e antrópicas reforçam a necessidade de considerar a não estacionariedade dos processos hidrológicos na gestão de recursos hídricos na região.

2.2 Artigo 2: Classificação hidrológica das bacias hidrográficas do Cerrado

Resumo: O Cerrado desempenha um papel estratégico na segurança hídrica do Brasil, abrigando nascentes de importantes bacias hidrográficas. No entanto, a crescente pressão sobre os recursos hídricos, somada às mudanças climáticas e ao uso intensivo da terra, impõe desafios à gestão sustentável. Sendo assim, este estudo realiza uma classificação hidrológica das bacias do Cerrado a fim de compreender os seus padrões fluviais, com base em assinaturas hidrológicas obtidas para 4.538 ottobacias. Foram calculadas métricas como vazão média diária, vazões de referência (Q_{10} , Q_{90}), declividade da curva de permanência (S_{FDC}), coeficiente de escoamento (RR), elasticidade da vazão (E_{QP}), índice de vazão de base (BFI), índice de aridez (AI), coeficiente de variação da vazão e frequência e duração das vazões altas e baixas. A análise de agrupamento hierárquico identificou quatro classes hidrológicas distintas, refletindo diferentes padrões de disponibilidade, regulação e variabilidade hídrica. A influência de variáveis climáticas, fisiográficas e antrópicas foi avaliada por meio de Random Forest e correlações de Spearman. Os resultados indicam que fatores climáticos, principalmente a precipitação, são os principais controladores dos regimes de vazão no bioma, embora aspectos como altitude, tipo de solo e uso da terra também desempenhem um papel relevante. Adicionalmente, foi aplicado o Índice de Diversidade de Shannon para avaliar a correspondência das classes hidrológicas com zonas climáticas, ecorregiões e regiões hidrográficas. As ecorregiões apresentaram maior coerência interna, sugerindo serem unidades mais eficazes para regionalização hidrológica. A abordagem proposta contribui para estratégias de gestão adaptativas e regionalizadas, fundamentais para a conservação dos recursos hídricos no Cerrado.

Palavras-chave: Agrupamento hierárquico. Assinaturas hidrológicas. Gestão de recursos hídricos. Índice de Diversidade de Shannon. Padrões hidrológicos.

1. Introdução

Considerado o segundo maior bioma brasileiro em extensão, o Cerrado desempenha um importante papel na segurança hídrica do Brasil. Sua localização central e padrão geomorfológico conferem ao bioma a condição de um importante divisor de águas, abrigando nascentes que alimentam grandes bacias hidrográficas, como as dos rios São Francisco, Tocantins, Araguaia, Parnaíba, Paraná e Paraguai (ANA, 2012; SILVA et al., 2024).

Essa função hidrológica torna o Cerrado essencial para a geração e manutenção dos fluxos hidrológicos, o que reflete no suporte às atividades econômicas do país como, por exemplo, para o setor energético, em que 77% das usinas hidrelétricas brasileiras dependem de rios cujas nascentes se localizam no Cerrado (ANEEL, 2022; SANTANA; RODRIGUES, 2024). Além disso, a região representa a principal fronteira agrícola do Brasil, com destaque nas produções de culturas anuais e perenes como a soja, milho, algodão e cana-de-açúcar (IBGE, 2023).

Contudo, a crescente demanda por recursos hídricos para a produção agrícola e demais usos econômicos tem imposto desafios à sua gestão nas bacias hidrográficas do Cerrado. Esses desafios são ampliados pela alta variabilidade climática e mudanças nos padrões de clima e uso e cobertura da terra verificadas nos últimos anos no bioma (POUSA et al., 2019; ALTHOFF et al., 2021; CORREIA FILHO et al., 2021).

Diante desse cenário, compreender os regimes de variação de vazão dos rios do Cerrado é fundamental para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos na região. Os regimes de vazão refletem os padrões típicos de escoamento ao longo do ano, como magnitude, periodicidade e variabilidade, e são influenciados por atributos fisiográficos, como uso e cobertura da terra, topografia, tipo de solo e área de drenagem, bem como por variáveis climáticas, como, por exemplo, a precipitação (MCMILLAN, 2019; MCMILLAN et al., 2022), destacadamente sua distribuição e variabilidade no tempo e no espaço (FERRAZZI et al., 2021).

Estudos recentes vêm apontando alterações nos regimes de vazão em algumas bacias hidrográficas do Cerrado, tendo o aumento da variabilidade das vazões e modificações na sazonalidade de eventos extremos, como inundações e secas, principais alterações desses regimes (FERRAZ et al., 2024; TEIXEIRA et al., 2024). Essas alterações hidrológicas afetam principalmente os pequenos cursos d'água, que são fundamentais para a subsistência de muitas comunidades locais, e que geralmente não são adequadamente considerados nos planos e na gestão de recursos hídricos. Nesse contexto, compreender o comportamento hidrológico das bacias do Cerrado é essencial para subsidiar estratégias de gestão mais eficazes, integradas e adaptativas, capazes de promover o uso sustentável dos recursos hídricos no bioma.

A classificação hidrológica ou do regime dos rios traz uma abordagem que pode auxiliar na compreensão dos padrões fluviais em nível de bacias hidrográficas. Essa abordagem consiste em agrupar as bacias com respostas hidrológicas ou padrões de regimes semelhantes entre si, facilitando a regionalização de informações, a extrapolação de modelos e a formulação de estratégias adaptadas às especificidades de cada classe obtida (KENNARD et al., 2010; OLDEN et al., 2012).

Essa classificação tem sido amplamente utilizada para identificar padrões hidrológicos espaciais, contribuindo para definição de estratégias de alocação de água, conservação ambiental e avaliação de impactos das mudanças do clima e do uso da terra sobre os regimes hídricos (SAWICZ et al., 2011; DAVID et al., 2019; MCMILLAN, 2020; ALMAGRO et al., 2024).

Quanto à metodologia empregada para a classificação de bacias hidrográficas, na literatura não há um consenso, sendo que diversas técnicas já foram utilizadas como o agrupamento hierárquico, k-means, agrupamento difuso (fuzzy), árvores de decisão, métodos bayesianos, e entre outros (BULLEY et al., 2008; KENNARD et al., 2010; SAWICZ et al., 2011; WOLFE et al., 2019). Entre as variáveis geralmente utilizadas nesses modelos, destacam as assinaturas hidrológicas que são métricas quantitativas de magnitude, periodicidade e/ou variabilidade representativas dos regimes hídricos (OLDEN et al., 2012; MCMILLAN, 2020).

Apesar da ampla aplicação da classificação hidrológica em diversas partes do mundo (KENNARD et al., 2010; TAVASSOLI et al., 2014; KUENTZ et al., 2017), a sua aplicação no Brasil tem ganhado forças apenas nos anos mais recentes. Enquanto estudos como os de David et al. (2019), Almagro et al. (2024) e Correa et al. (2025) têm avançado na classificação hidrológica em escala nacional, ainda permanece uma lacuna importante quanto a uma caracterização mais detalhada das bacias do Cerrado. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo classificar as bacias hidrográficas do bioma Cerrado utilizando assinaturas hidrológicas, a fim de identificar padrões espaciais de comportamento hidrológico e relacioná-los com fatores climatológicos, fisiográficos e de uso e cobertura da terra.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

Com cerca de 2 milhões de km², o equivalente a 24% do território brasileiro, o bioma Cerrado compartilha zonas de transição ecológica com quatro dos cinco biomas brasileiros: Amazônia (floresta tropical), Caatinga (região semiárida), Mata Atlântica (floresta costeira) e Pantanal (zona úmida) (Figura 1a), e essas transições revelam-se como um fator determinante na variabilidade climática da região.

Além disso, o Cerrado engloba parcialmente oito das doze regiões hidrográficas brasileiras (Figura 1b), sendo que a região hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a que apresenta

a maior porcentagem de sua área como parte do Cerrado (64,6%), seguida das regiões hidrográficas do Parnaíba (59,3%), Paraguai (48,6%), Atlântico Nordeste Ocidental (46,7%), São Francisco (46,7%), Paraná (46,0%), Atlântico Leste (10,4%) e a Amazônica (3,7%).

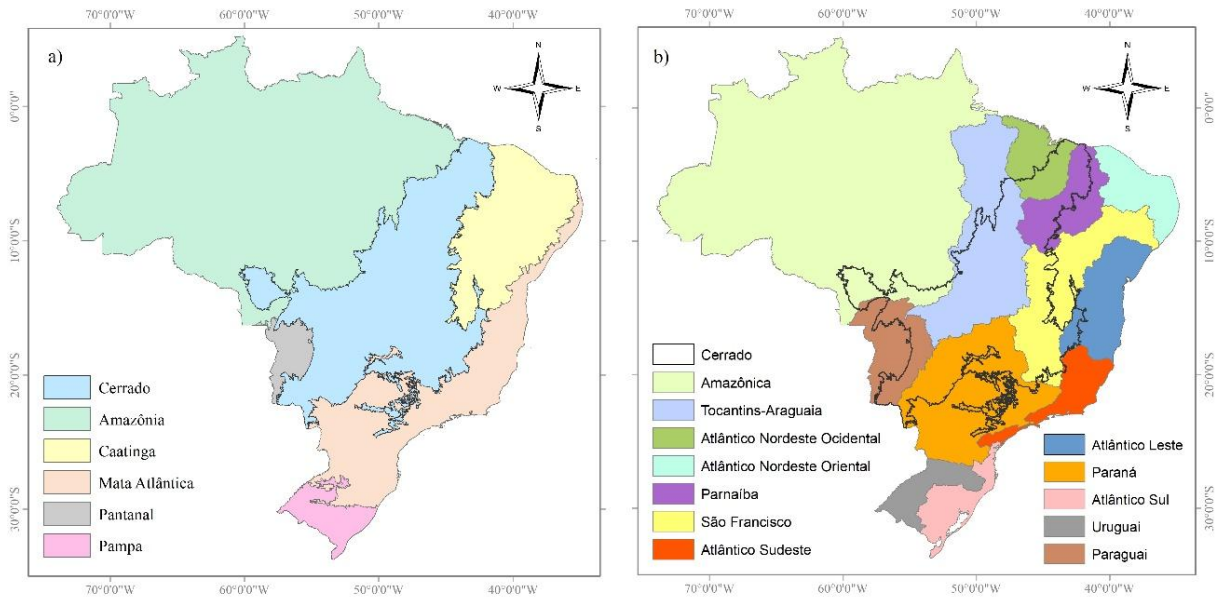


Figura 1. Localização do Cerrado em comparação aos: (a) demais biomas brasileiros e (b) regiões hidrográficas

Já em termos de contribuição para a vazão, a região hidrográfica do Parnaíba é a que apresenta a maior porcentagem de vazão originária do Cerrado (81,6%), seguida das regiões hidrográficas do São Francisco (74,8%), Tocantins-Araguaia (55,2%), Paraguai (51,6%), Paraná (41,7%), Atlântico Nordeste Ocidental (23,3%), Atlântico Leste (12,0%) e Amazônica (2,3%) (ALTHOFF; RODRIGUES, 2024).

O clima do Cerrado é classificado como tropical de savana e inverno seco (KÖPPEN, 1936), ou seja, apresenta as estações chuvosa e seca bem definidas, com temperatura média acima de 18°C em todos os meses do ano e precipitação do mês mais seco inferior a 60 mm. A sazonalidade das chuvas é uma característica marcante do bioma, e segundo Althoff et al. (2024), a distribuição dessas chuvas apresenta-se em três grupos distintos: (a) período seco, que corresponde aos meses de maio a setembro, com precipitação média mensal inferior a 50 mm; (b) período intermediário ou de transição, meses de abril e outubro, com precipitação média mensal de 100 mm; e (c) período chuvoso, correspondendo aos meses de novembro a março, com precipitação média mensal superior a 150 mm.

Além da variabilidade climática, aspectos fisiográficos como a topografia e os tipos de solo exercem influência expressiva sobre os processos hidrológicos no Cerrado. A região apresenta uma ampla variação altimétrica, com altitudes que vão de 0 a 2.792 m (Figura 2a). As maiores elevações estão concentradas nas porções centrais e sudeste do bioma, associadas às chapadas, serras e planaltos, enquanto as áreas mais baixas ocorrem no norte, noroeste e bordas ao oeste e sul, geralmente ocupadas por tabuleiros, depressões e planícies (SANTANA; RODRIGUES, 2024).

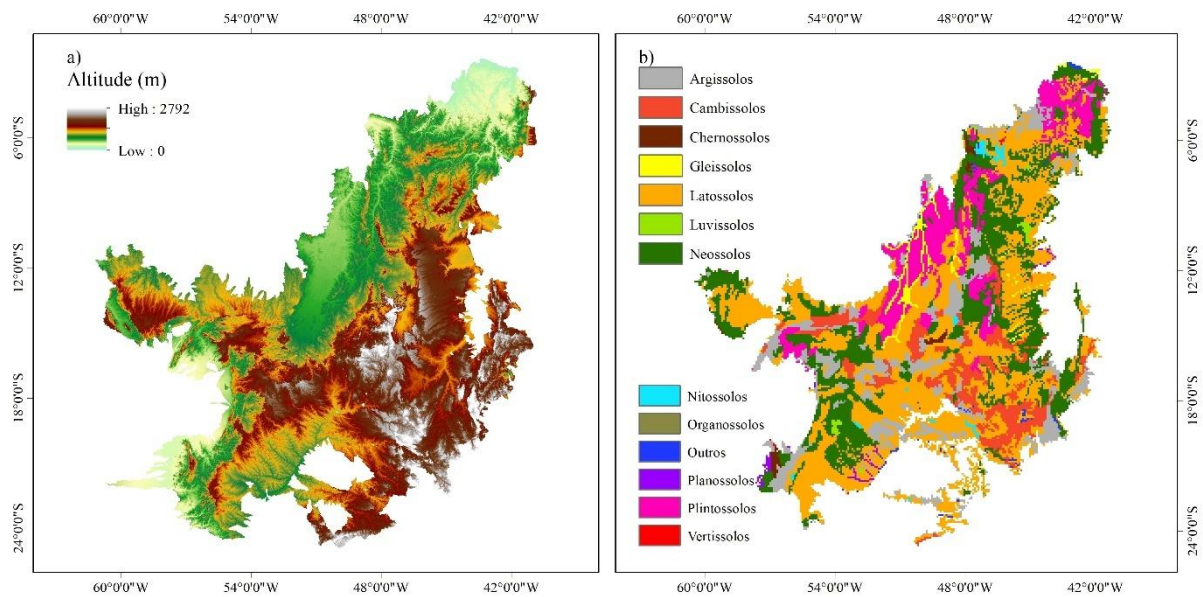


Figura 2. (a) Variação altimétrica e (b) classes de solo predominantes no Cerrado*

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2018)*.

Do ponto de vista edáfico, o Cerrado apresenta uma grande variedade de classes de solo (Figura 2b), com predomínio dos Latossolos, abrangendo 39,8% do bioma e distribuído em quase toda sua extensão. Estes solos são caracterizados pela boa drenagem e profundidade, favorecendo a infiltração e a recarga dos aquíferos, contudo, são solos de baixa fertilidade natural, exigindo a adoção de práticas conservacionistas para uso agrícola (SANTOS et al., 2018).

Os Neossolos, Argissolos e Plintossolos também apresentam uma distribuição significativa, abrangendo 24,3, 11,6 e 11,4% do Cerrado, respectivamente. Os Neossolos são pouco desenvolvidos, rasos e geralmente associados a áreas de relevo acidentado, favorecendo o escoamento superficial (SANTOS et al., 2018). Os Argissolos apresentam horizonte B textural, com suscetibilidade à erosão e variação na capacidade de infiltração, dependendo do

uso e manejo (SANTOS et al., 2018). Já os Plintossolos apresentam uma baixa permeabilidade, sendo mais propensos ao escoamento superficial (SANTOS et al., 2018).

2.2 Base da dados

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado a base de dados HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022), que contém informações diárias de vazão, precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o) para as ottobacias de nível 5 do bioma Cerrado no período de 2003 a 2019.

Essa série histórica de dados é composta por 4.538 ottobacias, permitindo uma classificação hidrológica abrangente e sistemática para o Cerrado. Os dados de vazão diária foram obtidos a partir do modelo hidrológico GR5J calibrado com dados de 411 estações fluviométricas do bioma. Os dados de precipitação diária se referem ao produto Integrated Multisatellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) (HUFFMAN et al., 2019) e os dados de ET_o diária trata-se da base de dados simulada para o Brasil obtidos por algoritmos de aprendizado de máquina (ALTHOFF et al., 2020).

Vale ressaltar que as ottobacias são as bacias e interbacias codificadas que seguem uma representação hierárquica da rede de drenagem, metodologia esta proposta por Otto Pfafstetter (PFAFSTETTER, 1989), que atualmente, é a metodologia oficial de codificação de bacias hidrográficas do Brasil (ANA, 2012).

2.3 Assinaturas hidrológicas

As assinaturas hidrológicas foram calculadas para cada uma das ottobacias do Cerrado com base no período anual. Foram consideradas as seguintes métricas: vazão média anual, vazões de referência máxima (Q₁₀) e mínima (Q₉₀), declividade da curva de permanência (S_{FDC}), elasticidade da vazão (E_{PQ}), coeficiente de escoamento (RR), índice de vazão de base (BFI), índice de aridez (AI), coeficiente de variação da vazão (CV) e a frequência e duração de eventos de vazões altas e baixas.

2.3.1 Vazão média anual (\bar{Q})

A vazão média anual foi calculada como a média aritmética da vazão considerando todos os anos de suas respectivas séries. O resultado dessa assinatura é a média de longo prazo denominada de vazão média anual (\bar{Q}) em unidade mm dia⁻¹. É importante destacar que, na base de dados HydroCerrado, os valores de vazão já estão expressos na unidade mm dia⁻¹. Essa

padronização visa facilitar a comparação direta com as variáveis precipitação e ETo, que são expressas em mm. A conversão de unidades foi realizada a partir do volume de água escoado por unidade de área da bacia, conforme descrito por Althoff et al. (2022).

2.3.2 Vazões máxima e mínima de referência (Q₁₀ e Q₉₀)

A vazão máxima de referência Q₁₀ corresponde ao 10º percentil da curva de permanência da série de vazões e a vazão mínima de referência Q₉₀ corresponde ao 90º percentil da curva de permanência da série de vazões. As vazões Q₁₀ e Q₉₀ são utilizadas para caracterizar as vazões extremas máxima e mínima, respectivamente, sendo correspondentes às vazões associadas às permanências de 10% e 90% no tempo, ou seja, são aquelas vazões igualadas ou superadas em 10% e 90% do tempo da série histórica de vazões, respectivamente. Essas assinaturas hidrológicas também foram obtidas na unidade mm dia⁻¹.

2.3.3 Declividade da curva de permanência (S_{FDC})

A declividade da curva de permanência (S_{FDC}) quantifica a variabilidade dos fluxos, em que bacias com alta declividade em sua curva de permanência de vazões diárias apresentam uma maior variabilidade das vazões ao longo do ano, e as de menores declividades indicam uma resposta dos fluxos mais amortecida, podendo sugerir uma maior influência do escoamento de base para a formação da vazão (ADDOR et al., 2018).

A S_{FDC} é obtida entre as vazões associadas às permanências de 33% (Q₃₃) e 66% (Q₆₆), e quando calculada em escala semi-logarítmica representa uma parte da curva de permanência relativamente linear (Equação 1) (SAWICZ et al., 2011).

$$S_{FDC} = \frac{\ln(Q_{33}) - \ln(Q_{66})}{0,66 - 0,33} \quad (1)$$

onde S_{FDC} é a declividade da curva de permanência (adimensional); Q₃₃ é a vazão associada à permanência de 33% no tempo; e Q₆₆ é a vazão associada à permanência de 66% no tempo.

2.3.4 Elasticidade da vazão (E_{QP})

A elasticidade da vazão (E_{QP}) é um indicador da sensibilidade da vazão média anual às mudanças na precipitação média anual. Sawicz et al. (2011) definem que um valor de E_{QP} maior que 1 caracteriza a bacia como elástica, ou seja, sensível às mudanças na precipitação, e um valor de E_{QP} menor que 1 indica uma bacia inelástica, insensível às mudanças na precipitação.

A E_{QP} foi calculada através da razão entre a diferença interanual da vazão anual e a diferença interanual da precipitação anual (Equação 2) (SAWICZ et al., 2011).

$$E_{QP} = \text{mediana}\left(\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - \bar{P}} \times \frac{\bar{P}}{\bar{Q}}\right) \quad (2)$$

onde E_{QP} é a elasticidade da vazão (adimensional); Q_t é a vazão média no ano t ; P_t é a precipitação média no ano t ; \bar{Q} é a vazão média anual de longa duração; e \bar{P} é a precipitação média anual de longo prazo.

2.3.5 Coeficiente de escoamento (RR)

O coeficiente de escoamento (RR) é definido como a razão da vazão média anual de longa duração com a precipitação média de longo prazo (Equação 3). Essa assinatura representa a separação dos processos de formação da vazão e da evapotranspiração em um balanço hídrico de longo a prazo, sendo que altos valores dessa assinatura indicam uma maior porcentagem da chuva que entra no sistema saindo como escoamento, e baixos valores de RR indicam que provavelmente a chuva que entra no sistema sai em grande parte como evapotranspiração (SAWICZ et al., 2011).

$$RR = \frac{\bar{Q}}{\bar{P}} \quad (3)$$

onde RR é o coeficiente de escoamento (adimensional); \bar{Q} é a vazão média de longo prazo; e \bar{P} é a precipitação média de longo prazo.

2.3.6 Índice de vazão de base (BFI)

O índice de vazão de base (BFI) mede a proporção do escoamento de base derivado do escoamento total a longo prazo, conforme a Equação 4. Para a estimativa da vazão de base, é adotado o método dos mínimos locais (UKIH Method), técnica amplamente empregada em estudos hidrológicos regionais, conforme recomendação da OMM (WMO, 2008).

$$BFI = \frac{\sum Q_{\text{base}}}{\sum Q_{\text{total}}} \quad (3)$$

em que Q_{base} é a vazão de base, estimada pela separação da contribuição subterrânea do escoamento total e a Q_{total} é a vazão total observada.

Um BFI mais elevado indica uma bacia com maior contribuição do escoamento de base, possuindo assim respostas mais lentas, enquanto baixos valores de BFI podem indicar bacias com respostas mais rápidas, ou seja, com grandes declividades na curva de permanência (GUSTARD et al., 1992; ADDOR et al., 2018).

2.3.7 Índice de aridez (AI)

O índice de aridez (AI) representa a relação entre a precipitação e evapotranspiração potencial, em que altos valores de AI indicam bacias mais úmidas e baixos valores de AI indicam bacias mais áridas (SAWICZ et al., 2011). Esta relação foi calculada através da Equação 5.

$$AI = \frac{\bar{P}}{\overline{ETP}} \quad (5)$$

onde AI é o índice de aridez (adimensional); \bar{P} é a precipitação média de longo prazo, e a \overline{ETP} é a evapotranspiração potencial média.

2.3.8 Coeficiente de variação (CV)

O coeficiente de variação (CV) foi calculado como a razão entre o desvio padrão e a média da vazão diária, multiplicada por 100, sendo assim expresso em porcentagem (%). Valores mais altos de CV indicam maior variabilidade no regime de vazões, enquanto valores mais baixos indicam maior estabilidade.

2.3.9 Frequência e duração das vazões altas e baixas (HQ_{freq} , HQ_{dur} , LQ_{freq} e LQ_{dur})

A assinatura de frequência das vazões altas (HQ_{freq}) foi obtida através do cálculo da frequência média anual em que as vazões ultrapassam nove vezes os valores da vazão média diária, e a duração das vazões altas (HQ_{dur}) foi a contagem de dias no ano em que essa vazão média foi superada nove vezes (ADDOR et al., 2018).

Para a frequência de vazões baixas (LQ_{freq}) foi obtida o cálculo da frequência média anual com que as vazões ficaram abaixo 0,2 vezes o valor da vazão média diária, e a sua duração

das vazões baixas (LQ_{dur}) foi calculada com a ocorrência de dias consecutivos no ano em que essas vazões ficaram abaixo 0,2 vezes da vazão média diária (ADDOR et al., 2018).

2.4 Classificação das bacias hidrográficas do Cerrado

A classificação das 4.538 ottobacias do Cerrado para a identificação das regiões consideradas mais homogêneas entre si foi realizada por meio do Agrupamento Hierárquico (AH), que é caracterizado por uma estrutura hierárquica em forma de árvore, na qual os objetos, nesse caso as ottobacias, são associadas e aquelas mais semelhantes entre si são agrupadas (EVERITT et al., 2011).

O método Ward foi selecionado como o procedimento de aglomeração, na qual a medida de similaridade foi calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos feitos com base em todas as variáveis (HAIR et al., 2009). A cada etapa do agrupamento combinaram-se dois agrupamentos que apresentavam o menor aumento na soma global de quadrados, repetindo esse processo até quando a aglomeração não promovesse mais similaridade entre os agrupamentos (HAIR et al., 2009).

O AH possibilita obter um conjunto de classes que descreve as informações de acordo com as suas similaridades. Para isso, foi utilizado o pacote do R NbClust (CHARRAD et al., 2022), na qual foi selecionada uma medida de similaridade, a distância euclidiana, que é a medida mais frequentemente utilizada quando se trata de variáveis quantitativas (EVERITT et al., 2011), e representa a proximidade entre as observações ao longo das variáveis.

Para definir o número de agrupamentos (classes) foram calculados 27 índices de identificação do número ideal de classes usando o pacote do R NbClust (CHARRAD et al., 2022). Esses índices determinaram o número ideal de agrupamentos para o conjunto de dados, ou seja, o número de classes ideal para a classificação das ottobacias do Cerrado.

2.5 Importância das variáveis

Para analisar a influência de variáveis climáticas, físicas e de uso e cobertura da terra na diferenciação entre as classes hidrológicas do Cerrado, foi obtida a importância das variáveis, métrica do modelo Random Forest (BREIMAN, 2001), considerando uma abordagem One-vs-All para cada classe. Os dados utilizados contemplam variáveis climáticas (precipitação e evapotranspiração), físicas (área da bacia, altitude, declividade, textura do solo) e de uso e cobertura da terra (vegetação, agricultura, pastagem, silvicultura, mosaico de usos, corpos d'água e área não vegetada).

As variáveis climatológicas correspondem às médias diárias anuais de precipitação e evapotranspiração obtidas a partir da base de dados HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022). As variáveis físicas altitude e declividade foram obtidas através do modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (FARR et al., 2007), de resolução de 30 metros, e os teores de areia, silte e argila obtidos, para fins de definição da textura do solo, a partir da plataforma SoilGrids, que apresenta dados de propriedades de solo estimados para o mundo inteiro (HENGL et al., 2017). As variáveis de uso e cobertura da terra correspondem às médias das classes de uso considerando o período de 2003 a 2019 obtidas pelo MapBiomas (2024).

Além disso, foi aplicada a correlação de Spearman entre as assinaturas hidrológicas e as variáveis climáticas, físicas e de uso e cobertura da terra para cada classe hidrológica, com o objetivo de avaliar o grau de associação estatística entre essas variáveis dentro de cada classe.

2.6 Índice de Diversidade de Shannon (H')

Com o objetivo de avaliar a heterogeneidade hidrológica obtida pela classificação das bacias hidrográficas do Cerrado, foi utilizado o Índice de Diversidade de Shannon Normalizado (H'). Essa métrica é tradicionalmente utilizada para quantificar a diversidade ecológica, mas tem sido cada vez mais utilizada na caracterização da diversidade de regimes hidrológicos (SILVA et al., 2016; FAIZ et al., 2019; ARIANO; ALI, 2025).

O índice H' avalia a heterogeneidade frente a outros sistemas, e para esse estudo foi utilizado três sistemas de referência espacial: as zonas climáticas de Köppen (KÖPPEN, 1936), as ecorregiões (SANO et al., 2019) e as regiões hidrográficas (ANA, 2015). O índice H' considera o número de classes hidrológicas obtidas na classificação e a distribuição das mesmas dentro dos sistemas, sendo calculado a partir da Equação 6.

$$H' = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln(p_i)}{\ln(n)} \quad (6)$$

Onde p_i é a proporção de bacias pertencentes a classe hidrológica i dentro de uma determinada zona climática, ecorregião ou região hidrográfica, e n é o número total de classes hidrológicas dentro dessa determinada zona.

O índice H' varia de 0 a 1, sendo que valores próximos de 0 indicam baixa diversidade hidrológica, ou seja, tem uma predominância de uma classe hidrológica dentro do sistema, e

valores próximos de 1 indicam alta diversidade hidrológica, sugerindo uma distribuição com diferentes classes hidrológicas.

Além de avaliar a diversidade hidrológica, o índice H' permite avaliar o potencial desses sistemas como unidades representativas (proxies) para regimes hidrológicos, ou seja, as zonas com menores diversidades hidrológicas podem indicar regiões mais homogêneas hidrológicamente, com maior potencial para uso como proxies em estratégias de regionalização hidrológica (ARIANO; ALI, 2025). Por outro lado, zonas com alta diversidade hidrológica interna exigem abordagens mais integradas para capturar adequadamente a complexidade dos regimes de vazão (ARIANO; ALI, 2025).

3. Resultados e discussão

3.1 Valores médios de vazão, precipitação e ETo nas ottobacias do bioma Cerrado

As ottobacias e as médias mensais da precipitação, vazão e ETo do bioma Cerrado provenientes da base de dados HydroCerrado são apresentadas na Figura 3.

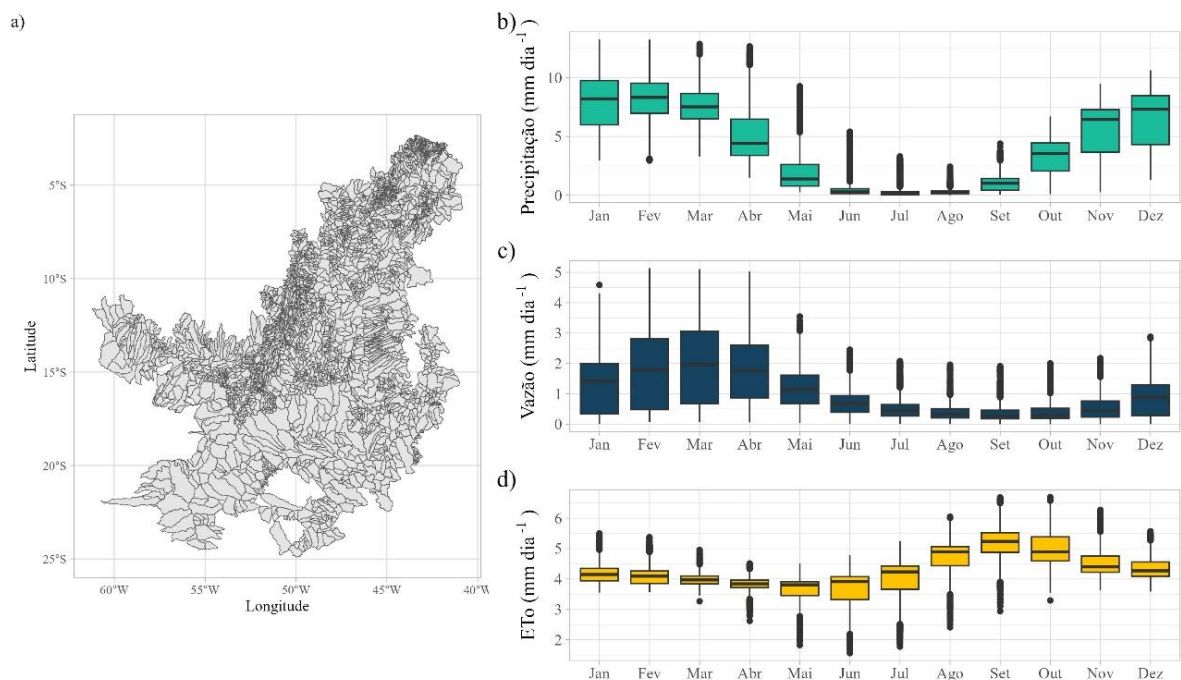


Figura 3. (a) Ottobacias nível 5 do bioma Cerrado e (b) os boxplots das médias mensais da precipitação, (c) vazão e (d) evapotranspiração de referência (ETo)

A sazonalidade das chuvas no Cerrado é evidente quando se observa a Figura 3b, onde os meses de menores precipitações são os de maio a setembro, com médias de chuvas inferiores

a 3 mm dia^{-1} , e os meses de maiores precipitações ocorrem de novembro a março, com médias superiores a $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$, com destaque para o mês de fevereiro que apresenta uma média de $8,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Além disso, pode-se verificar que é justamente no período chuvoso que ocorrem as maiores variações nos dados médios de chuva das ottobacias, observada pelo aumento das caixas dos boxplots e também como apontam Chagas et al. (2020) e Althoff et al. (2024).

No período chuvoso também ocorrem as maiores variações e valores de vazão (Figura 3c), principalmente a partir do mês de janeiro e se estendendo até abril, onde as médias chegam a ser superiores a $1,3 \text{ mm dia}^{-1}$, com destaque para o mês março que apresentou uma média de $1,9 \text{ mm dia}^{-1}$. Em contrapartida, os meses mais secos são os de menores médias, chegando a ter valores inferiores a 1 mm dia^{-1} .

Já para a ETo (Figura 3d), o período seco representa os meses de maiores variabilidades, sendo que as maiores médias ocorrem em setembro e outubro, com valores superiores a 5 mm dia^{-1} , e no restante dos meses as médias das ottobacias ficam entre 3 e 5 mm dia^{-1} .

3.2 Distribuição espacial das assinaturas hidrológicas

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial das assinaturas hidrológicas obtidas para as ottobacias do Cerrado.

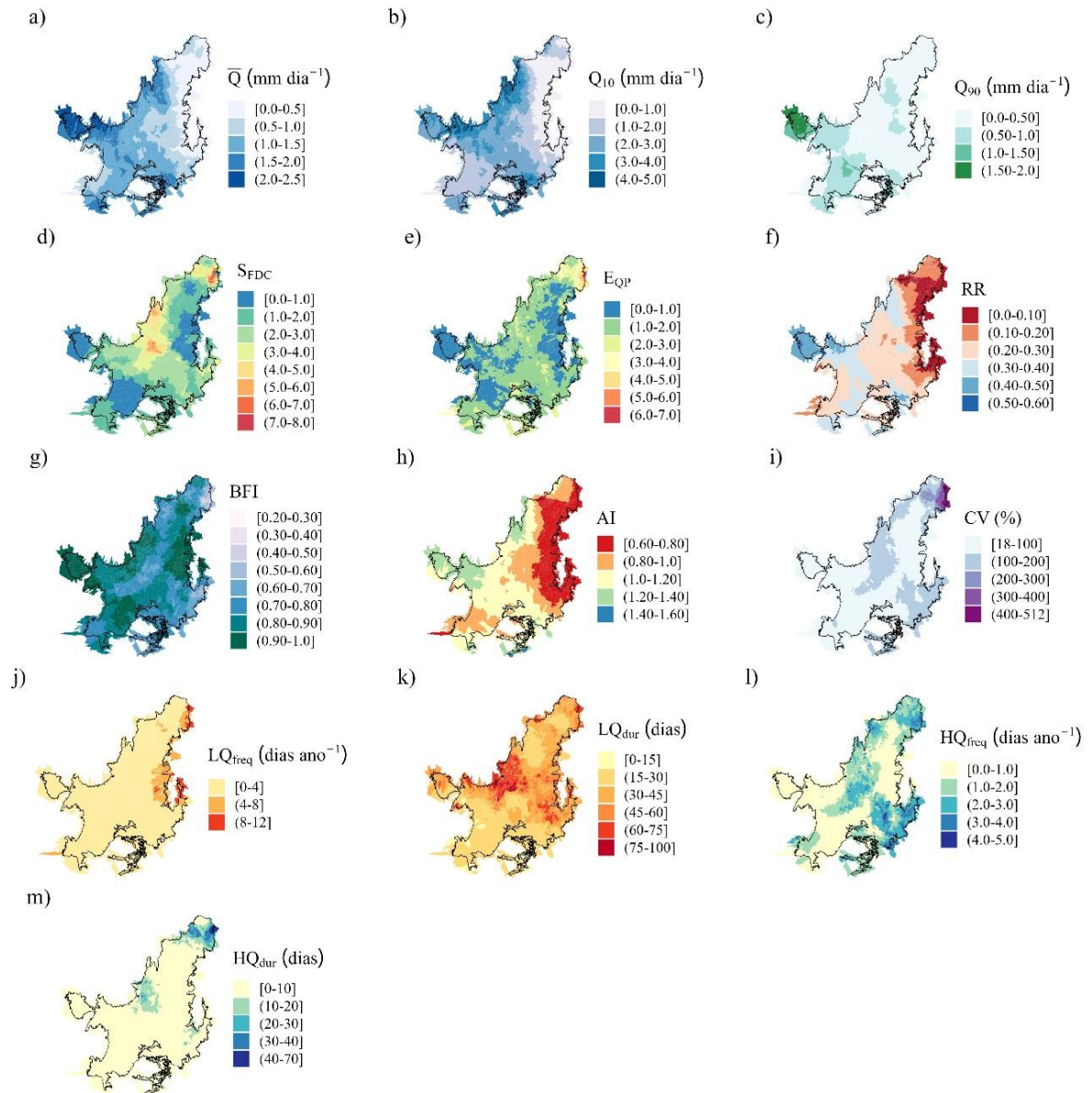


Figura 4. Distribuição espacial das assinaturas hidrológicas (a) vazão média anual (\bar{Q}), (b) vazão de permanência Q_{10} , (c) vazão de permanência Q_{90} , (d) declividade da curva de permanência (S_{FDC}), (e) elasticidade da vazão (E_{QP}), (f) coeficiente de escoamento (RR), (g) índice de vazão de base (BFI), (h) índice de aridez (AI), (i) coeficiente de variação da vazão (CV), (j) frequência das vazões baixas (LQ_{freq}), (k) duração das vazões baixas (LQ_{dur}), (l) frequência das vazões altas (HQ_{freq}) e (m) duração das vazões altas (HQ_{dur}).

A distribuição espacial da vazão média diária anual (\bar{Q}) (Figura 4a) revela um padrão crescente no sentido leste-oeste do Cerrado. As menores vazões médias, faixa de 0 e 0,5 mm dia⁻¹, concentram-se nas regiões de transição com o bioma Caatinga, enquanto os maiores valores médios, faixa entre 2 e 2,5 mm dia⁻¹, ocorrem nas regiões próximas ao bioma Amazônia. Esse padrão reforça a forte influência dos índices pluviométricos sobre os fluxos médios do

Cerrado, evidenciando a relação direta entre a precipitação e a disponibilidade hídrica (DOOGE, 1992).

A Q_{10} (Figura 4b), que representa as maiores vazões associadas à permanência de 10% do tempo, apresenta valores entre 0 e 5 mm dia⁻¹, e destaca o elevado potencial hídrico de bacias localizadas nas porções noroeste, centro e sul do bioma. Por outro lado, a Q_{90} (Figura 4c), que representa as menores vazões associadas à permanência de 90% do tempo, apresenta uma distribuição mais homogênea com predominância de valores na faixa de 0 e 0,5 mm dia⁻¹, podendo indicar nessas áreas limitações na capacidade de sustentação das vazões nos períodos mais secos.

A assinatura S_{FDC} (Figura 4d) apresenta valores entre 0 e 8 tendo os mais elevados nas porções norte e noroeste do Cerrado, indicando regiões de respostas mais rápidas aos eventos de precipitação. Os resultados para este índice foram semelhantes aos apresentados por Chagas et al. (2020), onde essa assinatura foi obtida com séries de vazões observadas. Contudo, McMillan et al. (2022) alertam para as incertezas da representatividade da S_{FDC} , uma vez que essa métrica é bastante sensível ao uso da terra e à presença de reservatórios.

A S_{FDC} pode estar relacionada com a assinatura BFI (Figura 4g), que reflete a contribuição das vazões de base no escoamento total. Os valores de BFI variaram de 0,2 a 1. Segundo Fan (2015), valores elevados de BFI indicam bacias mais resilientes nos períodos de estiagem e menos responsivas a eventos de chuvas mais intensos, o que pode fazer com que apresentem baixos valores da S_{FDC} . Esse comportamento é evidenciado no Cerrado, onde as regiões com baixos valores de S_{FDC} coincidem com áreas de altos valores de BFI, especialmente nas porções leste e oeste do bioma. Em estudo realizado para o Brasil, David et al. (2019) obtiveram valores de BFI entre 0,4 e 0,97, com os maiores valores no norte, sul e na porção oeste do nordeste brasileiro, esta que corresponde a porção leste do Cerrado. Nesse caso, embora a porção leste seja uma área mais árida, a presença de aquíferos porosos e com alta condutividade hidráulica favorece uma expressiva contribuição subterrânea ao regime fluvial dessa região (SILVA et al., 2024).

A assinatura E_{QP} (Figura 4h), que quantifica a sensibilidade da vazão média anual à variação da precipitação média anual, apresentou valores entre 0 e 7 tendo os maiores valores nas porções norte e noroeste do bioma, indicando maior vulnerabilidade hidrológica frente as variações pluviométricas. Nessas regiões, por exemplo, algumas bacias apresentaram E_{QP} maior que 4, indicando que uma variação de 1% na precipitação média anual gera uma mudança de 4% na vazão média anual. David et al. (2019) obtiveram E_{QP} variando entre 0,2 e 5,9, com os maiores valores na região litoral sudeste, centro-oeste e nordeste do Brasil.

A assinatura RR (Figura 4f), que representa a fração da precipitação que efetivamente se transforma em escoamento, apresenta valores na faixa de 0 a 0,6, onde os valores elevados estão nas porções oeste e sul do Cerrado. Nessas regiões, uma proporção mais significativa da chuva contribui diretamente para os fluxos. Em contrapartida, as menores taxas de RR identificadas nas porções leste e norte indicam que as saídas estão mais associadas a evapotranspiração e/ou infiltração. Chagas et al. (2020) reportaram valores de RR entre 0,15 e 0,55, com padrões semelhantes aos encontrados neste estudo.

A variabilidade climática do Cerrado pode ser visualizada pela assinatura AI (Figura 4h), que expressa a razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial. Os valores aumentam gradualmente de leste (região mais árida, em transição com a Caatinga) para oeste (região mais úmida, próxima à Amazônia), com uma variação de 0,6 a 1,6. No Brasil, David et al. (2019) observaram valores de AI entre 0,3 e 2,3, enquanto Chagas et al. (2020) relataram entre 0,5 e 1, ambos com os maiores índices no norte e sul, e os menores no nordeste, padrão consistente com a distribuição observada no Cerrado.

A assinatura CV da vazão (Figura 4i) apresenta uma faixa de valores entre 18 e 512%, evidenciando a alta variabilidade dos fluxos ao longo do ano, principalmente em uma pequena porção norte-leste do bioma. Esse comportamento pode ser explicado pela baixa capacidade de armazenamento subterrâneo, como pode ser visualizado pelos baixos valores de BFI para essa região podendo apresentar uma maior predominância do escoamento superficial após eventos de chuva evidenciado pelas assinaturas S_{FDC} e E_{QP} .

A frequência média anual de eventos de vazões baixas (LQ_{freq}) (Figura 4j) apresenta distribuição espacial homogênea no Cerrado, predominando entre 0 e 4 dias por ano com vazões consideradas baixas. No Cerrado, a porção leste concentra as maiores frequências de vazões baixas, evidenciando maior sensibilidade à escassez hídrica nessa região. Já a duração média desses eventos (LF_{dur}) (Figura 4k) pode ser considerada longa no Cerrado, frequentemente superando 15 dias, o que levanta preocupações em relação à segurança hídrica do bioma.

Por fim, a frequência anual dos eventos de vazões altas (HF_{freq}) (Figura 4l) é mais expressiva nas porções sudeste, noroeste e norte do Cerrado, regiões que tendem a ter resposta hidrológica mais rápida. Já a duração desses eventos (HQ_{dur}) (Figura 4m) é, em geral, curta, com valores entre 0 e 10 dias na maior parte do Cerrado. No entanto, algumas bacias ao norte apresentam médias entre 30 e 70 dias de vazões elevadas, revelando a ocorrência de eventos de cheia mais longos e frequentes.

3.3 Classificação hidrológica das bacias hidrográficas

O agrupamento hierárquico permitiu que as 4.538 ottobacias do Cerrado fossem agrupadas, sendo que 11 dos 27 índices de identificação do número ideal de agrupamentos consideraram quatro como o número ideal de classes. Na Figura 4 apresenta a distribuição espacial dessas quatro classes (Figura 5a), obtidas a partir das assinaturas hidrológicas, bem como a variação dessas assinaturas visualizadas por meio de boxplots (Figura 5b-5n).

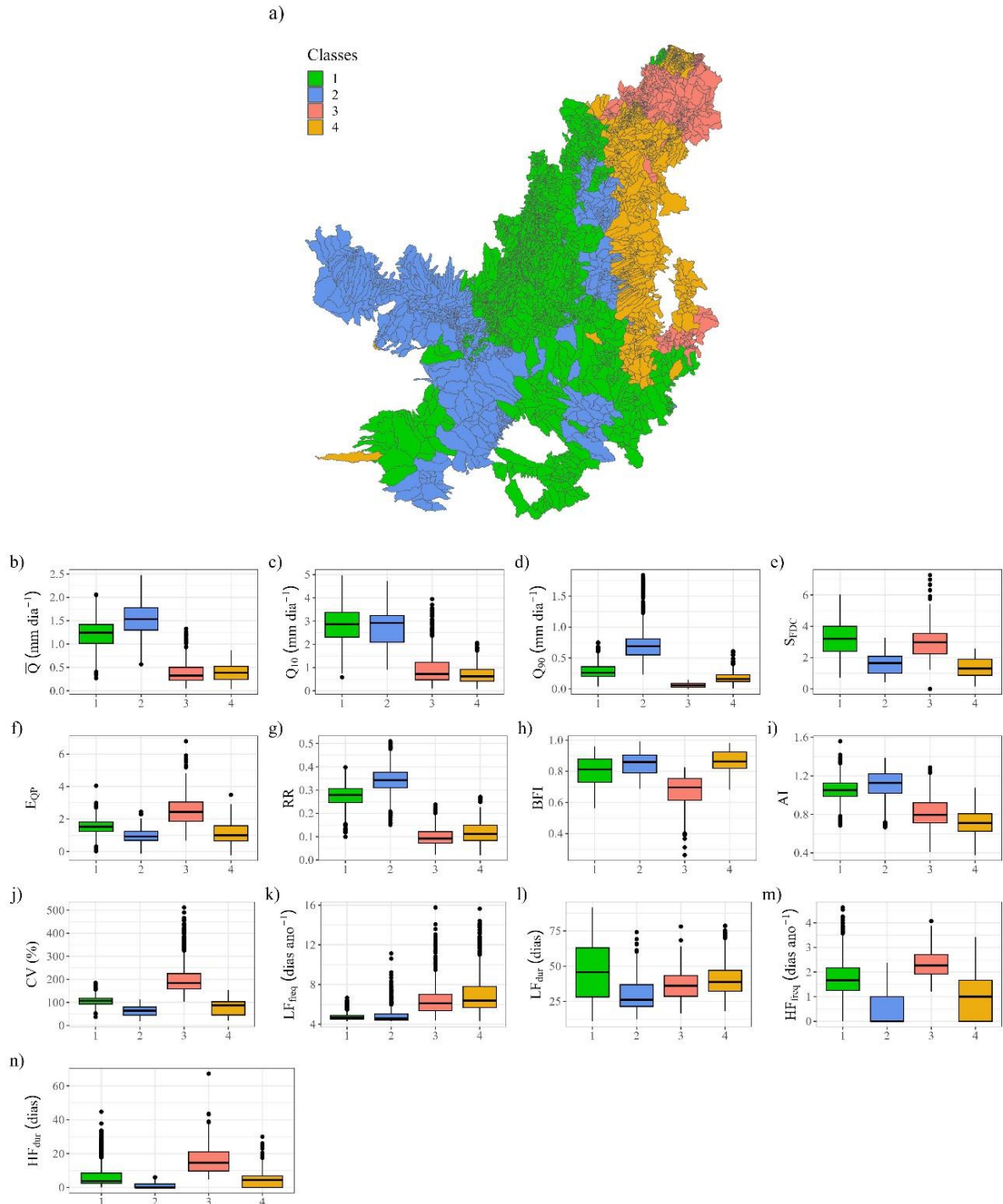


Figura 5. Distribuição espacial da classificação hidrológica das ottobacias do Cerrado (a) e

boxplots representando a variação das classes para as assinaturas: (b) vazão média diária anual (\bar{Q}), (c) vazão de permanência Q_{10} , (d) vazão de permanência Q_{90} , (e) declividade da curva de permanência (S_{FDC}), (f) elasticidade da vazão (EQP), (g) coeficiente de escoamento (RR), (h) índice de vazão de base (BFI), (i) índice de aridez (AI), (j) coeficiente de variação da vazão (CV), (k) frequência das vazões baixas (LQ_{freq}), (l) duração das vazões baixas (LQ_{dur}), (m) frequência das vazões altas (HQ_{freq}) e (n) duração das vazões altas (HQ_{dur}).

A Classe 1 ($n = 2.026$) constitui a maior região da classificação, ocupando 42,6% (1.106.932,2 km²) da área e está distribuída por diferentes porções do Cerrado, que inclui o noroeste, centro, sudeste, sul e norte. Já a Classe 2 é mais predominante nas porções oeste e sul, representando 31,7% (823.574,1 km²) da área. A Classe 3 tem uma forte presença na parte norte do Cerrado, abrangendo 7,7% da área (200.932,8 km²). Por sua vez, a Classe 4, que representa 17,9% da área (464.790,5 km²), está localizada majoritariamente na porção leste.

Essa espacialização das classes revela padrões hidrológicos distintos entre as bacias hidrográficas do Cerrado. As bacias classificadas como Classe 1 apresentam características de um regime hidrológico intermediário quando comparada com as demais classes. As assinaturas \bar{Q} , Q_{10} , RR e BFI apontam para uma boa disponibilidade hídrica e uma participação relevante do escoamento de base. Contudo, os valores de S_{FDC} e CV são moderadamente superiores aos da Classe 2, indicando uma variabilidade mais acentuada. Destaca-se também uma certa sensibilidade às variações interanuais de precipitação, evidenciada pelos moderados valores de EQP. O AI dessas bacias é relativamente elevado, refletindo que as condições climáticas são favoráveis à disponibilidade hídrica dessas bacias.

Exemplos representativos dessa classe incluem as bacias do Alto Tocantins, rio das Velhas e rio Paracatu, bacias com grande influência antrópica no Cerrado. A bacia do Alto Tocantins, localizada na região hidrográfica Tocantins-Araguaia, representa a área de drenagem de uma das usinas hidrelétricas mais importantes do Brasil, a UHE Serra da Mesa (GUEDES; HORA, 2016). Já a bacia do rio das Velhas, importante afluente do São Francisco em Minas Gerais, sofre maior influência antrópica, já com impactos no regime hidrológico, mas ainda mantém certa regularidade no escoamento em trechos menos urbanizados (MELO et al., 2019; ALMEIDA et al., 2023). A bacia do Paracatu, por sua vez, apresenta uso intensivo da água para irrigação, e uma redução das vazões mínimas verificadas na região, embora sua posição geográfica e características geomorfológicas ainda favoreçam um regime intermediário (SILVA et al., 2020; CAMPOS et al., 2022; FERREIRA et al., 2025). Esses exemplos reforçam a coerência dos agrupamentos identificados neste estudo com os padrões hidrológicos reportados

na literatura para importantes bacias do Cerrado.

A Classe 2 ($n = 862$) concentra bacias com o maior potencial hídrico. Os elevados valores de \bar{Q} , Q_{10} e RR indicam que essas bacias apresentam alta eficiência na conversão da precipitação em vazão. Os altos valores de BFI evidenciam uma forte contribuição do escoamento subterrâneo, o que resulta em maior estabilidade do regime de vazões (WMO, 2008), principalmente durante o período seco do ano. Tal estabilidade é confirmada pelos baixos valores de S_{FDC} e CV, indicando respostas hidrológicas amortecidas ao longo do tempo. As baixas frequências e durações dos eventos de vazão alta (HQ_{freq} e HQ_{dur}) são destacadas, revelando uma menor propensão a eventos extremos, característica de bacias bem estruturadas hidrológicamente (OLDEN et al., 2012).

A bacia do rio Cuiabá exemplifica bem esse grupo. A bacia do Cuiabá, fundamental para a dinâmica hidrológica do Pantanal, apresenta regime fluvial estável e baixa frequência de eventos de cheia, influenciada pela topografia plana e vegetação bem preservada (ASSINE et al., 2015). Essas características conferem à Classe 2 um padrão hidrológico eficiente e resiliente, compatível com os agrupamentos hidrológicos descritos por David et al. (2019).

A Classe 3 ($n = 543$) representa as bacias com baixa capacidade de regulação hídrica. Os baixos valores de \bar{Q} , Q_{10} , Q_{90} e RR revelam sistemas menos eficientes na geração de escoamento superficial, sendo as bacias com os menores valores de BFI no Cerrado. Em contrapartida, os elevados valores de S_{FDC} e CV indicam um regime hidrológico altamente variável, com respostas rápidas e acentuadas às precipitações (SAWICZ et al., 2011; OLDEN et al., 2012). Essa classe se destaca pelos altos valores de frequência (LQ_{freq}) e duração (LQ_{dur}) de eventos de vazão baixa, evidenciando maior recorrência de períodos secos e maior vulnerabilidade a eventos de escassez hídrica. Apesar da alta elasticidade da vazão (E_{QP}), os valores moderados de AI sugerem que o controle do regime hidrológico não é apenas climático, podendo estar fortemente influenciado por fatores fisiográficos.

No norte do Cerrado, onde a Classe 3 é predominante, observa-se um relevo bastante plano, e com o domínio de Plintossolos (Figuras 2a e 2b), e que em conjunto, pode promover condições de baixa capacidade de armazenamento e regulação natural do escoamento (SANTOS et al., 2018). Um exemplo dessa classe é a bacia do Itapecuru, no Maranhão, pertencente à região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental, que já possui além desses fatores físicos limitantes, intensa pressão antrópica e impactos sobre a quantidade e qualidade da água (SOARES et al., 2017).

Por fim, a Classe 4 ($n = 1.107$) agrega bacias com as menores vazões médias e capacidade de geração de escoamento entre todas as classes, refletindo condições hidrológicas mais

restritas. Os baixos valores de \bar{Q} , Q_{10} , Q_{90} e RR indicam sistemas com forte influência da evapotranspiração, mas com uma participação do escoamento de base evidenciada pelos altos valores de BFI . Embora a variabilidade das vazões (S_{FDC} e CV) seja elevada, seus valores são ligeiramente inferiores aos observados na Classe 3. As LQ_{freq} e LQ_{dur} seguem a mesma tendência, sendo elevadas, porém menos acentuadas do que na Classe 3. A Classe 4 também apresenta baixos valores de E_{QP} , indicando pouca sensibilidade hidrológica às variações de precipitação, e um AI reduzido, refletindo o fator climático como o principal na geração de escoamento.

As bacias do rio Corrente e do rio Grande, ambas localizadas na região hidrográfica do São Francisco, especificamente no oeste da Bahia, compõem a Classe 4 e refletem regiões com disponibilidade hídrica moderada, mas crescente pressão antrópica associada à expansão da agricultura irrigada. A bacia do rio Grande é estratégica para o desenvolvimento agropecuário da região, integrando parte do MATOPIBA, e nas quais já são observadas redução das vazões mínimas e alterações na sazonalidade devido à intensificação do uso agrícola e alterações no uso da terra (SILVA et al., 2021). A bacia do rio Corrente, por sua vez, vem enfrentando desafios relacionados a substituição da vegetação natural por áreas agrícolas na região, como a verificação de tendências significativas de redução das vazões (FERRAZ et al., 2022).

De forma geral, os resultados indicam que a Classe 2 representa bacias com maior estabilidade e sustentabilidade hídrica. Em contraste, as Classes 3 e 4 impõem maiores desafios à gestão hídrica: a Classe 3 devido às limitações fisiográficas e pressões antrópicas que podem comprometer a capacidade de regulação dos fluxos, e a Classe 4 em razão do fator climático mais restritivo, que limita naturalmente a geração de vazão. Ambas exigem estratégias específicas de manejo e uso racional dos recursos hídricos. A Classe 1 ocupa uma posição intermediária, com predominância de respostas rápidas e variabilidade acentuada, e demanda atenção quanto ao uso e cobertura da terra, visando preservar a capacidade de regulação hídrica dessas bacias.

Dada a diversidade dos padrões hidrológicos que foram identificados entre as classes, é importante analisar a dinâmica sazonal. Na Figura 6 é apresentada os valores médios diários de precipitação, evapotranspiração e vazão para cada uma das quatro classes hidrológicas identificadas no Cerrado.

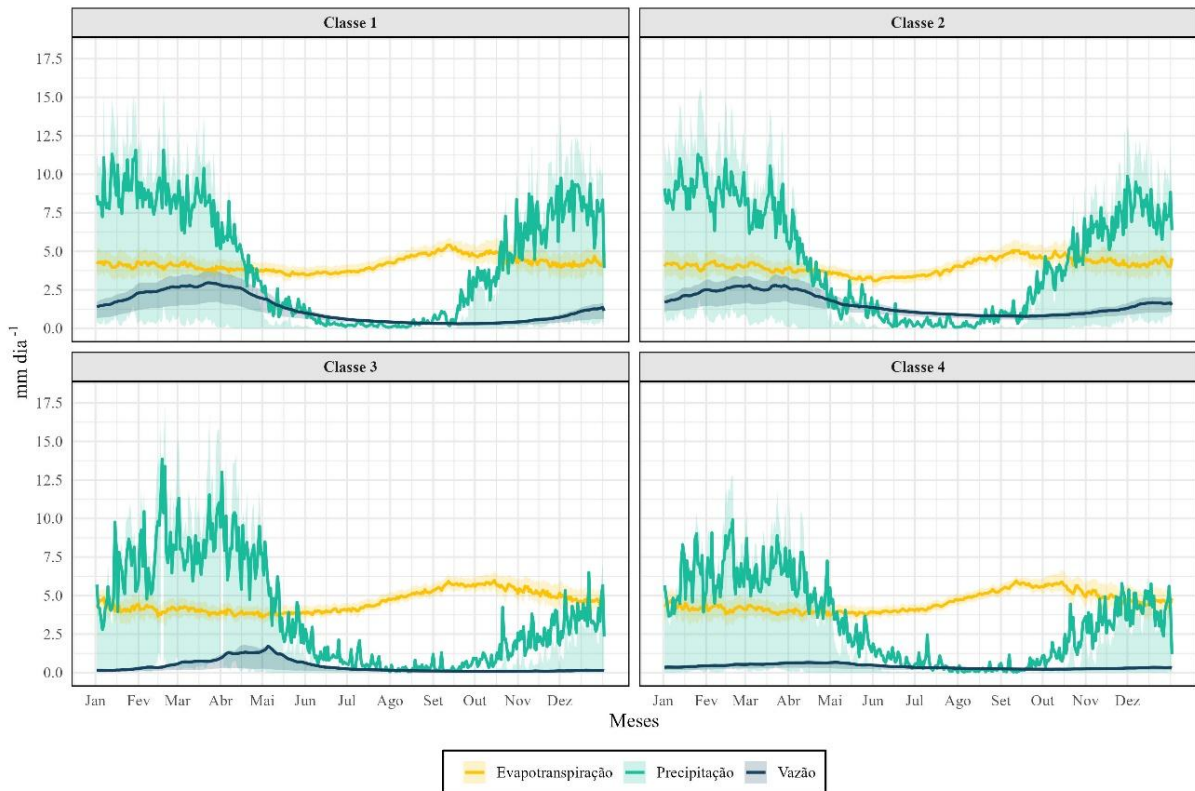


Figura 6. Valores médios diários de precipitação, evapotranspiração e vazão para cada uma das quatro classes hidrológicas identificadas no Cerrado

A análise da Figura 6 evidencia a forte sazonalidade dos fluxos hidrológicos no Cerrado, marcada por um regime hídrico com estações chuvosa e seca bem definidas. Contudo, as quatro classes demonstram dinâmicas hidrológicas distintas em termos de magnitude, variação das chuvas e persistência da vazão, o que reforça os padrões previamente identificados pelas assinaturas hidrológicas.

As Classes 1 e 2 são as bacias com os maiores fluxos pluviométricos, atingindo médias superiores a 11 mm dia^{-1} . Para essas bacias a concentração das chuvas estão entre os meses de outubro e março, o que as diferencia das Classes 3 e 4, onde a estação chuvosa é mais tardia, ocorrendo entre os meses novembro a maio. Inclusive, as maiores vazões para as bacias das Classes 3 e 4, com médias diárias inferiores a $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$, estão concentradas entre o início de abril e final de maio, indicando regimes hídricos sazonais diferentes quando comparadas as Classes 1 e 2.

Além disso, a Classe 2 apresenta uma resposta à precipitação de forma mais amortecida em comparação as demais classes, com uma menor variabilidade diária e vazões sustentadas por um período mais longo, inclusive durante a transição das estações. Em contraste, a Classe 3 revela o regime mais variável, chuvas com picos abruptos e concentrados nos primeiros meses

do ano. Durante a estação seca, as vazões se aproximam de zero, com recorrência de períodos secos prolongados. Esse comportamento reflete a resposta hidrológica rápida e de baixa regulação, característico de regiões mais vulneráveis à escassez hídrica (ALTHOFF et al., 2021).

A Classe 4 apresenta as menores vazões médias entre as quatro classes, com valores raramente superando 1 mm dia^{-1} , mesmo nos meses de maior precipitação. A vazão diária é bastante constante e baixa ao longo do ano, o que sugere forte controle climático, como verificado pelos baixos valores de AI. Apesar da baixa vazão, a evapotranspiração mantém-se elevada, especialmente durante os meses de agosto a outubro, contribuindo ainda mais na redução da disponibilidade hídrica. A evapotranspiração de todas as classes apresenta pouca variabilidade, tendo os dias do mês de setembro os maiores valores de ETo.

Esses padrões hidrológicos sazonais obtidos para o Cerrado são compatíveis com os grupos hidrológicos identificados por Almagro et al. (2024), que classificaram mais de 700 bacias hidrográficas brasileiras com base em assinaturas hidrológicas. Contudo, os autores identificaram apenas dois grupos predominantes no Cerrado: as bacias hidrográficas sazonais secas e bacias hidrográficas secas de transição. O primeiro grupo está localizado em todas as porções do Cerrado, exceto no norte e nordeste, sendo um grupo influenciado pelo clima com forte impacto das chuvas na geração das vazões. E o segundo grupo, localizado nas porções norte e nordeste do Cerrado, também com forte influência do clima, mas são bacias com alta demanda evaporativa que refletem no regime hídrico fluvial.

3.4 Importância das variáveis na classificação hidrológica

A compreensão dos regimes hidrológicos das bacias do Cerrado demanda também uma análise integrada de fatores climáticos, fisiográficos e de uso e cobertura da terra, uma vez que esses elementos condicionam os processos de geração de escoamento, armazenamento e liberação de água nos sistemas fluviais.

A Figura 7 apresenta a relação entre as assinaturas hidrológicas e os fatores climáticos (precipitação e evapotranspiração), físicos (área, altitude, declividades e textura do solo) e de uso e cobertura da terra (vegetação, pastagem, agricultura, silvicultura, mosaico de usos, corpos d'água e área não vegetada) para as Classes, 1, 2, 3 e 4. O tamanho das círculos indica a importância relativa de cada variável no modelo Random Forest, enquanto a coloração representa a correlação de Spearman entre a assinatura hidrológica e os fatores climáticos, físicos e de uso e cobertura da terra correspondente.

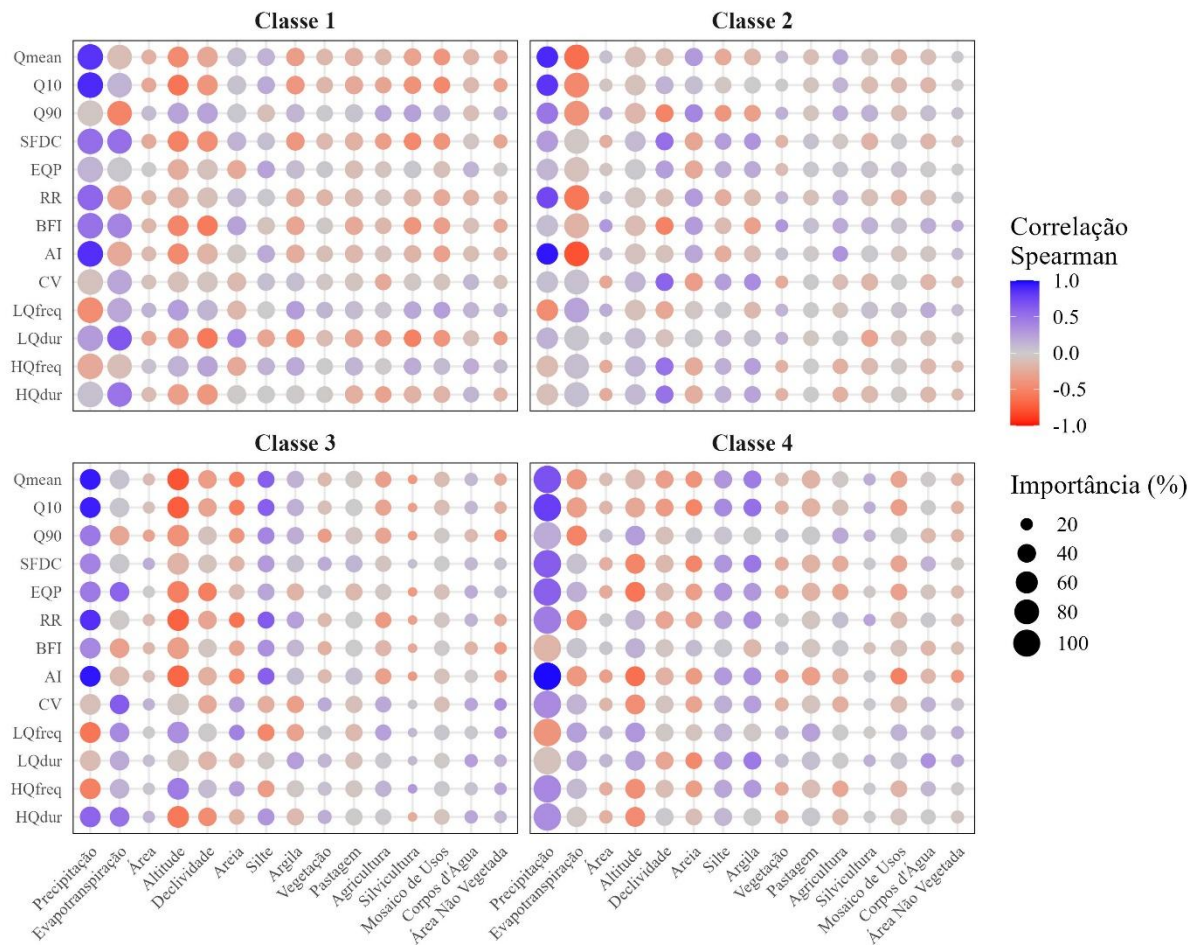


Figura 7. Importância (%) e correlação de Spearman entre as assinaturas hidrológicas e as variáveis climáticas, físicas e de uso e cobertura da terra para as Classes 1, 2, 3 e 4

A análise conjunta da importância das variáveis climáticas, físicas e de uso e cobertura da terra e suas correlações com as assinaturas hidrológicas revelou dinâmicas distintas entre as quatro classes identificadas no Cerrado. A Classe 1, por exemplo, apresenta um padrão interessante, embora a precipitação se destaque como uma das variáveis mais importantes para o modelo, algumas assinaturas, como a Q_{90} , CV e HQ_{dur} , mostraram correlação baixa com essa variável. Por outro lado, a Q_{90} apresentou correlações moderadas com variáveis associadas ao uso e cobertura da terra, como pastagem, agricultura e mosaico de usos, ainda que estas tenham desempenhado baixa importância no processo de classificação. Ou seja, o regime hídrico fluvial dessa classe pode estar mais relacionado às alterações do uso da terra do que diretamente ao regime pluviométrico.

Quanto a Classe 2, tanto a precipitação quanto a evapotranspiração mantêm-se como variáveis de alta importância e, ao contrário da Classe 1, as correlações com as assinaturas hidrológicas são mais consistentes, positivas em relação as chuvas e negativa em relação a

evapotranspiração. Além disso, os fatores de uso e cobertura da terra tem pouca relevância na classificação e baixa relação com as assinaturas. Esse padrão está alinhado com o que foi identificado nas assinaturas hidrológicas, que revelam bacias com alta capacidade de regulação, elevada contribuição do escoamento de base e baixa variabilidade sazonal.

Por fim, na Classe 4 a precipitação volta a se destacar como a variável de maior importância, corroborando diretamente com as características já observadas para essa classe, com bacias altamente dependentes do regime pluviométrico. As fortes correlações entre a precipitação e as assinaturas como \bar{Q} , Q_{10} , Q_{90} e RR reforçam a ideia de que o aporte de água é o principal fator de geração e sustentação do escoamento nessas regiões. Um ponto também a ser destacado é que mesmo que essas bacias estejam associadas a menor disponibilidade hídrica, a relação entre a evapotranspiração e as assinaturas é moderada, indicando que, embora a evapotranspiração atue como fator de perda, seu papel não é tão expressivo quanto o da própria limitação da precipitação.

Por fim, na Classe 4, a precipitação volta a se destacar como a variável de maior importância, corroborando diretamente com as características já observadas para essa classe, nas quais são bacias altamente dependente do regime pluviométrico. As fortes correlações entre a precipitação e as assinaturas como \bar{Q} , Q_{10} , Q_{90} e RR reforçam a ideia de que o aporte de água é o principal fator de geração e sustentação do escoamento nessas regiões. Um ponto também a ser destacado é que mesmo que essas bacias estejam associadas a menor disponibilidade hídrica, a relação entre a evapotranspiração e as assinaturas é moderada, indicando que, embora a evapotranspiração atue como fator de perda, seu papel não é tão expressivo quanto o da própria limitação da precipitação.

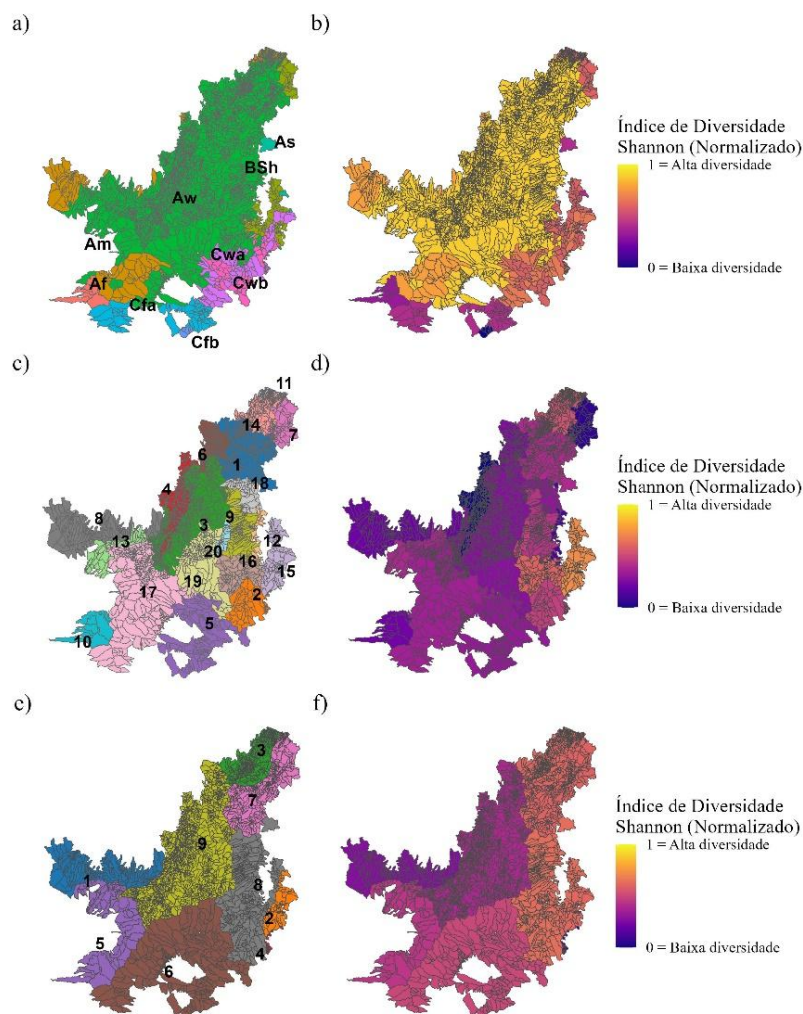
De modo geral, os resultados evidenciam que os fatores climáticos, especialmente a precipitação, são os principais determinantes do regime hidrológico na maior parte das bacias do Cerrado, principalmente das Classes 2 e 4. Por outro lado, a Classe 1 apresenta um padrão intermediário, no qual o uso e cobertura da terra parece exercer influência relevante sobre determinados aspectos do regime hidrológico, como vazões altas e variabilidade, mesmo que essas variáveis tenham tido menor importância na classificação. Na Classe 3, por sua vez, destaca-se o papel do fator físico, principalmente da altitude, refletindo as limitações pela topografia e pelas características do solo.

Estes resultados são compatíveis com as análises hidrológicas anteriores realizadas no Brasil com um recorte para o Cerrado (DAVID et al., 2019; ALMAGRO et al., 2024), reforçando a heterogeneidade dos regimes hidrológicos do bioma e evidenciando a necessidade de estratégias de gestão diferenciadas, que considerem tanto os condicionantes climáticos

quanto as especificidades fisiográficas e antrópicas de cada classe de bacias.

3.5 Aplicação do Índice de diversidade de Shannon

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial das zonas climáticas de Köppen (Figura 8a), das ecorregiões (Figura 8c) e das regiões hidrográficas (Figura 8e) do Cerrado, bem como as respectivas distribuições espaciais dos valores normalizados do Índice de Diversidade de Shannon, calculados a partir da classificação hidrológica das otobacias para zonas climáticas, ecorregiões e regiões hidrográficas.



Zonas climáticas de Köppen: Af = clima tropical superúmido ou equatorial; Am = clima tropical subúmido ou de monção; As = clima tropical de verão seco; Aw = clima tropical de savana e inverno seco; Bsh = clima semiárido quente; Cfa = clima subtropical com verão quente; Cfb = clima temperado com verão ameno; Cwa = clima subtropical de inverno seco e verão quente; Cwb = clima subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno. Ecorregiões: 1 = Alto Parnaíba; 2 = Alto São Francisco; 3 = Araguaia Tocantins; 4 = Bananal; 5 = Basaltos do Paraná; 6 = Bico do Papagaio; 7 = Centro-norte Piauiense; 8 = Chapada dos Parecis; 9 = Chapadão do São Francisco; 10 = Complexo Bodoquena; 11 = Costeiro; 12 = Depressão Cuiabana; 13 = Depressão Cársica do São Francisco; 14 = Floresta de Cocais; 15 = Jequitinhonha; 16 = Paracatu; 17 = Paraná Guimarães; 18 = Parnaíba; 19 = Planalto Central; 20 = Vão do Paraná. Regiões hidrográficas: 1 = Amazônica; 2 = Atlântico Leste; 3 =

Atlântico Nordeste Ocidental; 4 = Atlântico Sudeste; 5 = Paraguai; 6 = Paraná; 7 = Parnaíba; 8 = São Francisco; 9 = Tocantins-Araguaia.

Figura 8. (a) Zonas climáticas de Köppen do Cerrado, (c) ecorregiões do Cerrado, (e) regiões hidrográficas do Cerrado e (b, d, f) distribuição espacial do Índice de Diversidade Shannon Normalizado

Na Figura 8a observa-se o predomínio da classe climática Aw (tropical com inverno seco), que reflete a forte sazonalidade do Cerrado. Outras zonas também são destacadas como as classes Am (clima tropical de monção), Bsh (semiárido quente) e Cwa (subtropical de inverno seco), retratando a alta variabilidade climática do bioma. A análise espacial do respectivo Índice de Shannon (Figura 8b) revela que essas zonas climáticas apresentaram elevada diversidade hidrológica (valores próximos de 1), indicando alta heterogeneidade nos regimes de vazão dentro de uma mesma zona climática. Esse comportamento reforça a limitação do critério climático, isoladamente, como proxy para regionalização hidrológica, padrão este também apontado por Ariano e Ali (2025) para as bacias do Canadá, onde grandes zonas climáticas tiveram diferentes tipos de regime de vazões, explicadas por essas áreas apresentarem alta variabilidade física e de uso da terra.

Na Figura 8c são apresentadas as 20 ecorregiões do Cerrado, tendo as ecorregiões 3 (Araguaia Tocantins) e 17 (Paraná Guimarães) as mais extensas do bioma. Já na Figura 8d observa-se que muitas dessas ecorregiões apresentam índices de Shannon inferiores a 0,5, indicando uma menor diversidade hidrológica, ou seja, maior homogeneidade hidrológica entre as bacias pertencentes à mesma ecorregião. Exemplos dessa homogeneidade incluem as ecorregiões 4 (Bananal) e 7 (Centro-norte piauiense), podendo essa uniformidade estar associada à maior consistência geológica, topográfica e de uso e cobertura da terra dentro dessas ecorregiões (SANO et al., 2019), o que resulta em respostas hidrológicas mais semelhantes entre as bacias (ARIANO; ALI, 2025).

Na Figura 8f, a distribuição do índice de Shannon para as regiões hidrográficas revela um padrão intermediário quando comparada com as zonas climáticas e as ecorregiões. Regiões como a 1 (Amazônica), 4 (Atlântico Sudeste) (ocupada por apenas uma otobacia) e 9 (Tocantins-Araguaia) apresentam os valores mais baixos do índice, enquanto as porções norte e leste do Cerrado, possuem maior diversidade dos regimes de vazão.

De modo geral, os resultados indicam que as ecorregiões apresentaram a melhor correspondência com a distribuição dos regimes hidrológicos classificados neste estudo, podendo servir como proxies mais eficazes do que as zonas climáticas e as regiões hidrográficas

para fins de regionalização hidrológica no Cerrado. Além disso, o tamanho das unidades espaciais utilizadas como proxies parece interferir na capacidade de representar a diversidade hidrológica, pois unidades amplas, como as zonas climáticas, apresentaram alta diversidade interna, o que dificulta a generalização hidrológica, enquanto unidades menores, como as ecorregiões demonstram maior homogeneidade.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A classificação hidrológica das bacias hidrográficas do Cerrado, obtida a partir de assinaturas hidrológicas, permitiu a identificação de quatro classes distintas de regimes de vazão, refletindo diferentes padrões de respostas hidrológicas associados a características climáticas, físicas e de uso e cobertura da terra. Essa abordagem contribuiu para uma melhor compreensão da dinâmica hidrológica do Cerrado, destacando as múltiplas combinações de fatores que influenciam no comportamento das bacias hidrográficas no bioma;

- As classes hidrológicas identificadas apresentaram coerência espacial e hidrológica, permitindo a caracterização de regiões com maior ou menor regulação hídrica, variações sazonais e sensibilidades a fatores ambientais. Essa diferenciação tem implicações para a gestão de recursos hídricos no Cerrado, podendo subsidiar políticas públicas mais adaptadas às especificidades de cada região;

- A análise complementar do Índice de Diversidade de Shannon contribuiu para avaliar a distribuição espacial das classes hidrológicas em diferentes sistemas, sugerindo que as ecorregiões apresentam maior coerência interna em relação aos regimes de vazão do que as zonas climáticas e as regiões hidrográficas. Isso reforça a importância de considerar menores dimensões na regionalização hidrológica, principalmente em regiões de alta heterogeneidade como o Cerrado; e

- O uso das classificações de bacias hidrográficas constitui-se como ferramenta estratégica para o planejamento e gestão de recursos hídricos, principalmente na compreensão dos regimes de vazão para apoio de ações de monitoramento, conservação e alocação hídrica de forma mais eficiente, adaptativa e sustentável.

2.3 Artigo 3: Índice de sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do Cerrado

Resumo: O Cerrado, principal fronteira agrícola do Brasil, enfrenta crescentes desafios na gestão dos recursos hídricos, sobretudo durante a estação seca, marcada pela escassez de chuvas, aumento da demanda hídrica e intensificação da irrigação. Diante desse cenário, este estudo propõe e desenvolve o Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps) para avaliar a sustentabilidade hídrica das bacias hidrográficas do Cerrado durante a estação seca. O índice integra sete indicadores representativos da disponibilidade - vazão de permanência (Q_{95}), regulação - declividade da curva de permanência (S_{FDC}), índice de vazão de base (BFI) e coeficiente de recessão (k), condições climáticas - índice de aridez (IA), pressão antrópica - percentual médio de área irrigada e mitigação - percentual média de área com vegetação nativa, combinados por meio de normalização e ponderação com base na relevância hidrológica de cada indicador. Os resultados revelaram uma ampla heterogeneidade espacial de sustentabilidade hídrica no bioma, com destaque para as porções oeste e sul, que apresentaram valores mais elevados de ISHps, indicando uma maior sustentabilidade hídrica durante a estação seca. Já a região norte demonstra uma menor sustentabilidade, associada à baixa disponibilidade hídrica e menor capacidade de regulação. A análise espacial integrada, incluindo a sobreposição com polos de irrigação e pivôs centrais, revelou zonas de conflito potencial entre demanda e disponibilidade hídrica. Adicionalmente, a classificação das bacias em regiões homogêneas permitiu identificar padrões distintos de sustentabilidade hídrica. O ISHps mostrou-se uma ferramenta eficaz para subsidiar políticas públicas de uso racional dos recursos hídricos e ordenamento territorial, principalmente em cenários de mudanças climáticas e expansão agrícola.

Palavras-chave: Área irrigada. Disponibilidade hídrica. Estação seca. Ponderação. Regulação hídrica.

1. Introdução

O bioma Cerrado é considerado a principal fronteira agrícola do Brasil, ocupando uma posição estratégica tanto no cenário econômico quanto no contexto de segurança alimentar e hídrica no país. Sua extensão de aproximadamente 2 milhões de km^2 junto à sua localização central e padrões geomorfológicos conferem ao Cerrado um papel fundamental na disponibilidade hídrica, refletindo em um potencial agrícola para o país (CAIXETA; CARNEIRO, 2024; RODRIGUES et al., 2024).

Atualmente, o Cerrado é responsável por 60% de toda a produção agrícola brasileira, com destaque para culturas como algodão, milho e soja, sendo que esta última chega a responder a 22% das exportações mundiais (MAPBIOMAS, 2024; WEF, 2024). Além disso, mais da metade da área irrigada do Brasil está localizada nesse bioma (ANA, 2021), chegando a concentrar 80% dos pivôs centrais do país (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Contudo, a intensificação dessas atividades no Cerrado tem promovido desafios quanto à disponibilidade e à alocação de recursos hídricos, exigindo cada vez mais um planejamento estratégico que promova um desenvolvimento sustentável da agricultura na região.

Esses desafios são ainda mais ampliados quando considerada a alta variabilidade climática do bioma, que é marcada pela forte sazonalidade, apresentando as estações chuvosa e seca bem definidas ao longo do ano (ALTHOFF et al., 2024). Além disso, os efeitos das mudanças climáticas já são observados na região, como o prolongamento do período seco, redução da precipitação, aumento da irregularidade das chuvas e aumento das temperaturas (CORREIA FILHO et al., 2021; HOFMANN et al., 2021). Esses fatores impactam diretamente os processos hidrológicos no Cerrado, reduzindo a sua recarga hídrica e aumentando as taxas de evapotranspiração, comprometendo a disponibilidade de recursos hídricos, principalmente nos meses mais secos do ano.

Diante desse cenário, o período seco tem se consolidado como uma fase crítica para a gestão dos recursos hídricos no Cerrado. A redução das chuvas junto a elevação das temperaturas e da demanda hídrica durante a estação seca pode comprometer a manutenção dos fluxos para as atividades humanas e agrícolas, e dos ecossistemas aquáticos no bioma. Rios de menor porte tendem a apresentar quedas acentuadas de vazão ou até mesmo a interrupção dos fluxos durante o período seco, intensificando a dependência de fontes alternativas como barragens e aquíferos (SCANLON et al., 2017; LATHUILLIÈRE et al., 2018). Portanto, torna-se fundamental a adoção de estratégias de planejamento territorial e alocação hídrica que considerem a aptidão das regiões à sustentação das atividades durante o período seco.

O uso de indicadores tem se tornado uma ferramenta promissora para integrar múltiplas dimensões ambientais, climáticas e hidrológicas em uma única métrica, auxiliando as tomadas de decisão e o ordenamento do território (SULLIVAN et al., 2003; LIU et al., 2017). Tais índices permitem identificar áreas de maior ou menor vulnerabilidade hídrica, apoiando a formulação de políticas públicas voltadas a produção sustentável e a segurança hídrica (SULLIVAN, 2002; LIU et al., 2017).

Diversos indicadores têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas com o objetivo de mensurar e monitorar a escassez hídrica em diferentes contextos. Entre os mais utilizados,

destacam-se o Water Stress Index (WSI), que relaciona a disponibilidade de água com a demanda total (FALKENMARK et al., 1989), e o indicador SDG 6.4.2, que avalia o estresse hídrico com base na proporção entre retirada total de água doce e a disponibilidade renovável (VANHAM et al., 2018). Também merecem destaque a Pegada Hídrica (HOEKSTRA et al., 2011) e o Indicador Quantity-Quality-Environmental (QQE) (ZENG et al., 2013), que integra quantidade, qualidade e manutenção do fluxo ambiental. Embora eficientes em escalas globais ou nacionais, esses indicadores nem sempre capturam especificidades regionais, como a sazonalidade marcante e as condições hidrológicas locais do Cerrado.

No contexto brasileiro, iniciativas como o índice de risco do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) (BRASIL, 2023) tem contribuído para orientar o planejamento da produção agrícola em função das condições climáticas, mas ainda não incorporam de forma integrada a dinâmica hidrológica, principalmente durante o período seco. No Cerrado, Ferreira e Rodrigues (2025) desenvolveram um índice de aptidão hídrica com foco na viabilidade da agricultura de sequeiro e irrigada no Cerrado, integrando informações de solo, clima e disponibilidade hídrica para identificar áreas mais aptas à produção agrícola.

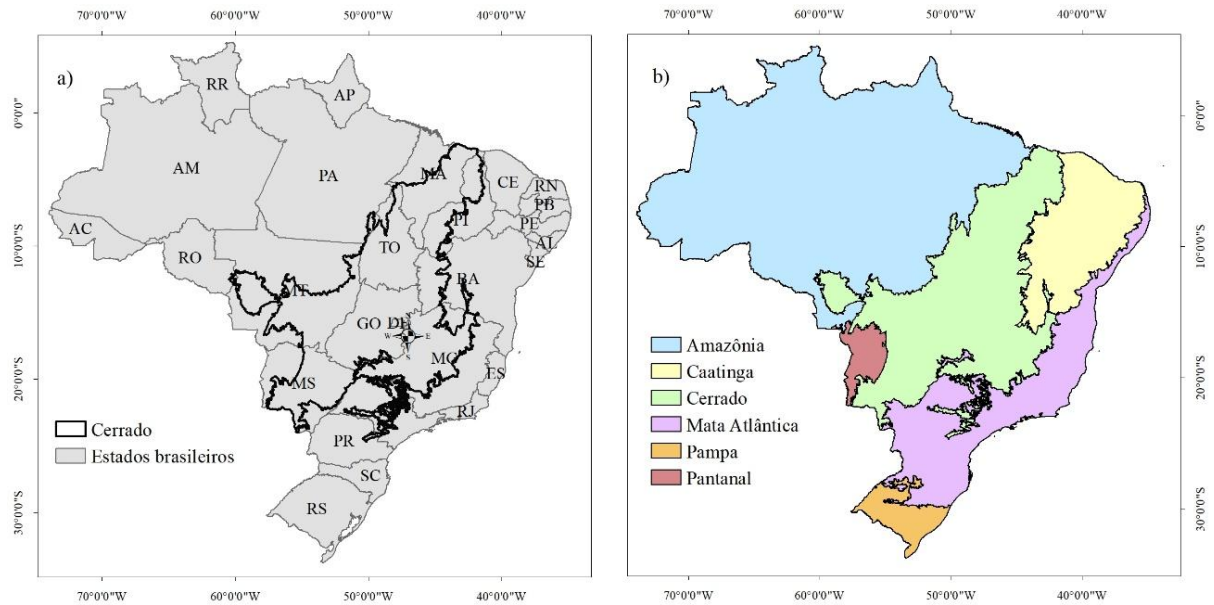
Apesar dos avanços, há uma lacuna quanto à existência de índices específicos que representem de forma abrangente a sustentabilidade hídrica do Cerrado durante a estação seca. Esse período, caracterizado pela escassez de chuvas, aumento das temperaturas, redução das vazões e intensificação da demanda hídrica, principalmente pela irrigação, que se torna essencial para sustentar a produção agrícola na estação seca, agravam ainda mais a situação, comprometendo a disponibilidade de recursos hídricos para as diversas atividades no Cerrado (FERREIRA et al., 2023; ALTHOFF et al., 2024; RODRIGUES et al., 2024). Nesse sentido, o objetivo desse estudo é desenvolver um índice hidrológico que avalie a sustentabilidade hídrica das bacias hidrográficas do Cerrado durante a estação seca, a fim de oferecer subsídios para o planejamento territorial e políticas públicas, e contribuir para o uso mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos no bioma.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido no bioma Cerrado, região que corresponde a cerca de 24% do território brasileiro (Figura 1a). O Cerrado está localizado na porção central e compartilha zonas de transição com quatro dos cinco biomas do Brasil: Amazônia (floresta tropical), Caatinga (região semiárida), Mata Atlântica (floresta costeira) e Pantanal (zona

úmida) (Figura 1b), tornando essa transição um fator determinante na variabilidade climática e ecológica da região (SANO et al., 2019; ALTHOFF et al., 2024).



Estados brasileiros: AM = Amazonas; AC = Acre; RO = Rondônia; RR = Roraima; AP = Amapá; PA = Pará; TO = Tocantins; MA = Maranhão; PI = Piauí; CE = Ceará; RN = Rio Grande do Norte; PB = Paraíba; PE = Pernambuco; AL = Alagoas; SE = Sergipe; BA = Bahia; MT = Mato Grosso; MS = Mato Grosso do Sul; GO = Goiás; DF = Distrito Federal; MG = Minas Gerais; ES = Espírito Santo; RJ = Rio de Janeiro; SP = São Paulo; PR = Paraná; SC = Santa Catarina; RS = Rio Grande do Sul.

Figura 1. (a) Localização do bioma Cerrado no Brasil e (b) biomas brasileiros

O clima do Cerrado é caracterizado pela forte sazonalidade, tendo sua classe climática de Köppen predominante a Aw (tropical de savana e inverno seco), configurando em duas estações bem definidas: a estação chuvosa, que se estende de outubro a março, e uma estação seca, de abril a setembro (Althoff et al., 2024). A precipitação média anual apresenta elevada variabilidade espacial, variando entre 479 mm e 2.512 mm, sendo influenciada por fatores climáticos e ambientais (ALTHOFF et al., 2024; REBOITA; FERREIRA, 2024; SILVA et al., 2024).

O relevo do Cerrado também apresenta alta variabilidade, com altitudes menores que 200m concentradas na porção norte do bioma e áreas acima de 1.500 m concentradas nas porções central e sudeste, correspondendo às áreas de chapadas e planaltos (SANTANA; RODRIGUES, 2024). Os solos no Cerrado são predominantemente Latossolos (39,8%) e Neossolos (24,3%), distribuídos em diversas porções do Cerrado, influenciando diretamente nos processos de infiltração, armazenamento de água no solo e recarga dos aquíferos no bioma (VELOSO et al., 2024).

A hidrogeologia do Cerrado é marcada pela presença de importantes aquíferos, como o Bambuí, Urucuia e Guarani, sendo este último um dos maiores reservatórios de água subterrânea do mundo, que se estende por grande parte na porção sul do bioma. Os aquíferos da região apresentam diferentes naturezas geológicas, sendo classificados como intergranulares, fraturados e cársticos, podendo ser livres ou confinados (AUGUSTO; CAMPOS, 2024).

No contexto antrópico, a ocupação do Cerrado é influenciada pelo conjunto dos fatores ambientais citados acima, tendo uma conversão do uso do solo bem nítida ao longo do tempo para as atividades agropecuárias em decorrência dos avanços tecnológicos da agricultura mecanizada, pecuária extensiva e agricultura irrigada (SANTANA; RODRIGUES, 2024).

2.2 Desenvolvimento do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco

Com o objetivo de avaliar a sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do Cerrado durante o período seco, foi desenvolvido o Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps), que busca sintetizar em uma única métrica fatores que influenciam a disponibilidade hídrica, a capacidade de regulação e a intensidade da irrigação durante a estação seca.

A proposta metodológica combinou a normalização de indicadores com a atribuição de pesos pré-definidos, sendo estes determinados com base na relevância hidrológica de cada indicador para caracterizar a sustentabilidade hídrica do período seco no Cerrado.

O ISHps foi desenvolvido em uma escala que varia de 0 a 1, onde valores próximos de 0 indicam menor sustentabilidade hídrica, refletindo bacias com baixa disponibilidade hídrica, capacidade de regulação limitada e elevada proporção de área irrigada. Por outro lado, valores próximos de 1 indicam maior sustentabilidade hídrica, representando bacias com maior disponibilidade hídrica, maior capacidade de regulação e menor presença de áreas irrigadas.

Nos itens a seguir serão apresentados em mais detalhes o desenvolvimento do ISHps, desde a obtenção da base de dados ao cálculo do índice.

2.2.1 Base de dados

O desenvolvimento do ISHps foi realizado a partir da base de dados HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022), que é composta por dados diários de vazão, precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o) no período de 2003 a 2019 para um total de 4.538 otobacias do Cerrado. Essa base confere ampla cobertura espacial, permitindo uma aplicação abrangente do ISHps.

As séries de vazão foram derivadas pelo modelo hidrológico GR5J calibrado com dados de 411 estações fluviométricas do Cerrado. A precipitação corresponde ao produto Integrated Multisatellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) (HUFFMAN et al., 2019) e a ETo foi obtida através algoritmos de aprendizado de máquina aplicados ao Brasil (ALTHOFF et al., 2020).

Vale ressaltar que as ottobacias são as bacias e interbacias delimitadas e codificadas com base em uma estrutura hierárquica da rede de drenagem, que seguem a metodologia proposta por Otto Pfafstetter (PFAFSTETTER, 1989), metodologia esta que é a oficial de identificação e organização das bacias hidrográficas no Brasil (ANA, 2012).

Os dados de área irrigada e vegetação nativa também foram utilizados nesse estudo. Para isso, foram obtidos os mapeamentos de irrigação e de uso e cobertura da terra (MAPBIOMAS, 2024), extraindo a média da área irrigada e da vegetação nativa para cada ottobacia considerando o período entre 2003 e 2019.

2.2.2 Seleção, normalização e ponderação dos indicadores

A seleção dos indicadores que compõem o ISHps foi baseada na identificação das principais métricas que influenciam a disponibilidade e a resiliência hídrica das bacias hidrográficas do Cerrado durante a estação seca. Assim, na Tabela 1 são apresentados os sete indicadores selecionados para o desenvolvimento do ISHps, bem como a descrição e a justificativa de escolha de cada indicador, representando-os em aspectos climáticos, hidrológicos, ecológicos e antrópicos referentes ao comportamento dos sistemas hídricos nesse período crítico.

Tabela 1. Indicadores selecionados para o desenvolvimento do ISHps

Indicador	Grupo	Descrição	Justificativa
Vazão mínima Q ₉₅	Disponibilidade	Vazão igualada e superada em 95% do tempo; representa a oferta mínima hídrica	Indicador direto da segurança hídrica; amplamente usado nas concessões de outorga
Declividade da Curva de Permanência (S _{FDC})	Regulação	Declividade da curva de permanência entre as vazões Q ₃₃ e Q ₆₆	Representa a variabilidade do escoamento; menor declividade indica maior estabilidade e regulação

Índice de Vazão de Base (BFI)	Regulação	Proporção do escoamento subterrâneo sobre o escoamento total	Representa a resiliência hídrica na seca; avalia a capacidade de manutenção dos fluxos mínimos
Coefficiente de Recessão (k)	Regulação	Taxa de declínio da vazão após eventos de chuva	Complementa o BFI; indica persistência da vazão e eficiência do armazenamento subterrâneo
Área Irrigada (%irrig)	Antrópico	Percentual de área irrigada da bacia	Principal fator de demanda adicional na seca
Índice de Aridez (IA)	Climático	Razão entre precipitação e evapotranspiração; expressa o balanço hídrico	Representa a pressão climática na estação seca
Vegetação Nativa (%veg)	Mitigação	Percentual de cobertura natural da bacia	Atua como fator mitigador indireto; contribui para infiltração e estabilidade hidrológica

Uma vez definidos os indicadores, para cada ottobacia foram obtidos os valores desses indicadores considerando o período seco, ou seja, calculados para os meses de abril a setembro, exceto para os indicadores %irrig e %veg que foram obtidos com base anual. Em seguida, os valores foram normalizados em função do valor máximo observado de cada indicador dentro da região do Cerrado, isto é, os valores obtidos em cada ottobacia foram normalizados em uma escala adimensional de 0 a 1, a partir da divisão do valor observado do indicador na ottobacia e o maior valor observado para aquele indicador no conjunto de dados (Equação 1) (FERREIRA; RODRIGUES, 2025).

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_i}{X_{\text{max}}} \quad (1)$$

em que X_i é o valor observado do indicador para cada ottobacia; X_{max} é o maior valor observado do indicador no Cerrado.

Essa normalização, baseada no maior valor observado dentro da região, permite comparar regiões menores (otobacias) dentro de uma região maior (Cerrado), o que torna essa abordagem válida apenas para o Cerrado.

Para os indicadores S_{FDC} , k e $\%irrig$, a normalização foi invertida ($1 - X_{norm}$), de modo que as bacias com maiores declividades da curva de permanência, maiores coeficientes de recessão e percentuais médios de área irrigada recebessem valores mais baixos de sustentabilidade hídrica.

Na etapa seguinte, os indicadores foram ponderados com base na sua relevância relativa para a manutenção hídrica durante o período seco. Os critérios de ponderação adotados para cada indicador são detalhados nos itens subsequentes.

2.2.2.1 Indicador de disponibilidade hídrica

O primeiro indicador da ISHps é a Q_{95} que corresponde a vazão igualada e superada em 95% do tempo, frequentemente adotada como referência para a concessão de outorgas de direitos de uso da água para bacias de jurisdição federal e estadual (ANA, 2013). É um indicador de disponibilidade hídrica, maiores valores indicam maior possibilidade de crescimento, por exemplo, da irrigação (FERREIRA; RODRIGUES, 2025).

Dada sua importância como indicador de crescimento de atividades econômicas em região, a Q_{95} foi incorporada ao ISHps com o peso de 0,25, refletindo um papel central na avaliação da sustentabilidade hídrica durante o período seco.

2.2.2.2 Indicadores de regulação hídrica

O indicador S_{FDC} foi incluído no ISHps por representar a variabilidade do escoamento ao longo do período seco, onde bacias com maior declividade indicam maior variabilidade das vazões e bacias com menor declividade indicam um escoamento mais estável e regulado, com maior capacidade de sustentar a vazão mínima (SAWICZ et al., 2011). O indicador S_{FDC} foi calculado para o período seco a partir da Equação 2.

$$S_{FDC} = \frac{\ln(Q_{33}) - \ln(Q_{66})}{0,66 - 0,33} \quad (2)$$

onde S_{FDC} é a declividade da curva de permanência (adimensional); Q_{33} é a vazão no percentil 33; e Q_{66} é a vazão no percentil 66.

No Cerrado durante o período seco, devido a recarga hídrica ser mais limitada, a S_{FDC} foi considerada um indicador relevante para complementar a análise da regulação dos fluxos hídricos, assim foi atribuído ao ISHps com peso de 0,15.

O indicador BFI foi incluído no ISHps por representar a contribuição relativa das águas subterrâneas ao escoamento total de uma bacia, calculado a partir da separação entre esses escoamentos, onde altos valores indicam bacias com maior contribuição do escoamento da base e baixos valores indicam bacias mais impermeáveis com um regime mais rápido (GUSTARD et al., 1992; WMO, 2008). Durante o período seco, quando as chuvas são mais escassas, os fluxos fluviais dependem majoritariamente do escoamento de base, assim o BFI é um indicador direto da resiliência hidrológica das bacias frente aos períodos mais secos. Dado ao seu papel central na manutenção dos fluxos mínimos, o BFI foi considerado como um dos principais indicadores do ISHps com peso de 0,20.

Outro indicador diretamente ligado a estação seca e ao escoamento de base é o coeficiente k , que representa a taxa com que a vazão diminui ao longo do tempo após cessarem os eventos de chuva. Então, bacias com baixos valores de k apresentam um declínio mais lento da vazão, indicando maior resiliência hidrológica e capacidade de sustentar a oferta hídrica durante a estação seca refletindo na velocidade de esvaziamento do armazenamento subterrâneo (WMO, 2008). Por outro lado, bacias com altos valores de k revelam uma perda rápida da vazão, sugerindo maior vulnerabilidade hídrica frente a escassez (WMO, 2008). O indicador k foi obtido a partir da Equação 3.

$$k = - \frac{\ln(Q_t/Q_0)}{t} \quad (3)$$

em que Q_0 e Q_t são os valores de vazão no início e no final do trecho recessivo em dias, respectivamente; t é o intervalo de tempo em dias entre as vazões de início e final de um trecho recessivo. O período mínimo adotado para a identificação dos trechos recessivos foi de 5 dias (WMO, 2008).

No contexto do Cerrado, onde o período seco se estende por vários meses e a recarga hídrica pode ser limitada, a inclusão do k fornece uma medida sobre a eficiência do armazenamento subterrâneo e a sustentação dos fluxos fluviais. Portanto, trata-se de um indicador hidrológico relevante para caracterizar a persistência de água na bacia mesmo em condições de baixa recarga, justificando seu uso no ISHps com um peso de 0,10.

2.2.2.3 Indicador antrópico

O indicador %irrig corresponde ao principal fator direto das pressões antrópicas sobre os recursos hídricos nas bacias do Cerrado durante o período seco. Em regiões do bioma onde há uma forte expansão agrícola e baixa disponibilidade hídrica no período seco, a vulnerabilidade hídrica das bacias pode ampliar significativamente os processos de escassez e riscos de colapsos hídricos locais (LATHUILLIÈRE et al., 2018). Portanto, dada a sua importância como fator de maior pressão sobre os recursos hídricos durante a estação seca, foi atribuído o peso de 0,15 no cálculo do ISHps.

2.2.2.4 Indicador climático

O indicador IA foi incluído no ISHps por ser uma métrica climática importante na caracterização da escassez hídrica de uma bacia. O IA foi calculado como a razão entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, refletindo o balanço hídrico, onde valores baixos indicam climas mais áridos, em que a evaporação supera a precipitação, o que pode intensificar o estresse hídrico de bacias (SAWICIZ et al., 2011).

A inclusão do IA no ISHps complementa os indicadores hidrológicos e antrópicos ao capturar a pressão climática sobre os recursos hídricos e no contexto do período seco do Cerrado, pode contribuir na identificação de bacias com maior propensão a aridez climática, mesmo que outras condições sejam favoráveis.

Dada sua função de apoio na caracterização da vulnerabilidade climática, o IA foi incorporado ao índice com um peso de 0,10 no cálculo do ISHps.

2.2.2.5 Indicador de mitigação

O indicador %veget representa o percentual de cobertura por vegetação nativa dentro da bacia, sendo um fator hidrológico e ecológico do ISHps devido a sua capacidade de regulação e resiliência hídrica das bacias. Embora sua atuação seja mais evidente durante o período chuvoso, a vegetação nativa exerce um papel indireto, mas importante na manutenção da umidade do solo, recarga de aquíferos e redução da evaporação (ANACHE et al., 2019; D'ACUNHA et al., 2024).

Além dos aspectos hidrológicos, a vegetação nativa está associada a sustentabilidade dos fluxos de base e a qualidade da água, pois áreas com maior cobertura vegetal tende a apresentar menor degradação ambiental, menos erosão e menor carga de sedimentos, favorecendo a estabilidade dos cursos d'água mesmo na estação seca (HUNKE et al., 2015; NÓBREGA et al.,

2017). Sua importância torna-se ainda mais relevante nos cenários de mudanças climáticas, aumento do desmatamento e expansão agrícola no Cerrado que têm comprometido a capacidade das bacias em reter e conservar água (SALMONA et al., 2023).

Assim, a vegetação nativa é incorporada ao índice como um fator de mitigação da sustentabilidade hídrica, com um peso de 0,05, dada a sua contribuição indireta para a manutenção da disponibilidade hídrica em contextos de estresse hídrico prolongado.

2.3 Cálculo do ISHps

O cálculo efetivo do ISHps, com base nos pesos definidos para cada indicador, é apresentado na Equação 4.

$$\text{ISHps}_i = 0,25 Q_{95\text{norm } i} + 0,15 S_{\text{FDCnorm } i} + 0,20 \text{BFI}_{\text{norm } i} + 0,10 k_{\text{norm } i} + 0,15 \text{irrig}_{\text{norm } i} + 0,10 \text{IA}_{\text{norm } i} + 0,05 \text{veget}_{\text{norm } i} \quad (4)$$

em que ISHps_i representa o valor do índice calculado para a ottobacia i ; $Q_{95\text{norm } i}$ é o valor normalizado da Q_{95} da ottobacia i ; $S_{\text{FDCnorm } i}$ é o valor normalizado da S_{FDC} da ottobacia i ; $\text{BFI}_{\text{norm } i}$ é o valor normalizado do BFI da ottobacia i ; $k_{\text{norm } i}$ é o valor normalizado do k da ottobacia i ; $\text{irrig}_{\text{norm } i}$ é o valor normalizado do %irrig da ottobacia i ; $\text{IA}_{\text{norm } i}$ é o valor normalizado do IA da ottobacia i e $\text{veget}_{\text{norm } i}$ é o valor normalizado do %veget da ottobacia i .

2.4 Identificação das regiões homogêneas

A fim de identificar áreas com características semelhantes de sustentabilidade hídrica durante o período seco no Cerrado, foi realizada uma análise de agrupamento com base no conjunto de indicadores que compõem o ISHps. Para isso, utilizou-se o algoritmo K-Means que consiste em dividir o conjunto de dados em grupos de modo a maximizar a similaridade interna e a dissimilaridade entre os grupos (classes) (YUAN; YANG, 2019).

Para definir o número ideal de agrupamentos, foi adotado método do cotovelo que mede a variação da soma dos quadrados dentro dos grupos em função do número de grupos, identificando o ponto de inflexão em que o acréscimo de novos agrupamentos não melhora significativamente a homogeneidade interna da classe (VARELLA; QUADRELLI, 2017).

3. Resultados e discussão

3.1 Indicadores do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial dos sete indicadores utilizados no desenvolvimento do ISHps, os quais foram transformados para a escala adimensional por meio da normalização dos valores em relação ao máximo observado para cada indicador, permitindo comparar as condições relativas de sustentabilidade hídrica entre as bacias do Cerrado.

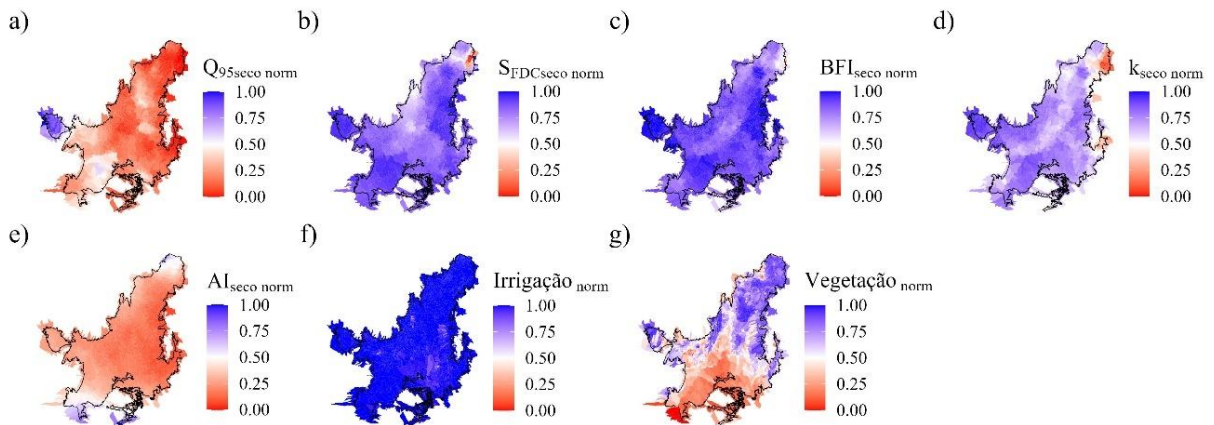


Figura 2. Distribuição espacial dos indicadores normalizados do período seco que compõem o ISHps: (a) vazão mínima Q_{95} , (b) declividade da curva de permanência (S_{FDC}), (c) Índice de Vazão de Base (BFI), (d) coeficiente de recessão (k), (e) Índice de Aridez (IA), (f) percentual médio de área irrigada e (g) percentual médio de vegetação nativa

Inicialmente, observa-se que a vazão mínima Q_{95} normalizada do período seco (Figura 2a) apresenta em grande parte os menores valores, principalmente na porção leste do Cerrado, região de transição com o bioma Caatinga, que é caracterizado pelo clima árido. Nessas porções de baixos valores, a Q_{95} chega a ser inferior a $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$, indicando as menores disponibilidades hídricas durante a estiagem no Cerrado. Em contrapartida, destacam-se os valores mais elevados na porção oeste do bioma, sinalizando bacias com condições mais favoráveis de disponibilidade hídrica, onde os valores de Q_{95} chegam a ser superiores a $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$.

No que se refere aos indicadores de regulação, a S_{FDC} normalizada do período seco (Figura 2b) mostra que os maiores valores normalizados se concentram em bacias das porções oeste, leste e sul do Cerrado, indicando bacias com menor variabilidade do regime de vazão, apresentando assim uma maior capacidade de regulação. Esse padrão espacial também é

observado para o indicador BFI normalizado do período seco (Figura 2c), porém com valores relativos altos mais distribuídos no Cerrado, sugerindo uma participação significativa do escoamento subterrâneo no escoamento total nas bacias do bioma. Esse comportamento reforça o papel estratégico do Cerrado na disponibilidade hídrica do Brasil, não apenas em termos de escoamento superficial, mas também em termos de fluxos subterrâneos.

O comportamento espacial do coeficiente k normalizado do período seco (Figura 2d) revela algumas diferenças na velocidade com que a vazão diminui após a ocorrência de chuvas no Cerrado. Os valores relativos mais baixos concentram em algumas bacias das porções norte e leste do bioma, refletindo um declínio mais rápido das vazões após os eventos de chuva. Porém, no geral, o Cerrado apresenta regiões com valores relativos altos, com destaque para os menores valores de k na porção oeste do bioma, apresentando assim um escoamento mais duradouro, e portanto, de maior eficiência do armazenamento da água no solo e no subsolo, o que contribui diretamente para uma maior disponibilidade hídrica, como pode ser observado para os valores de Q_{95} nessa região.

Em termos de condições climáticas, o indicador IA normalizado do período seco (Figura 2e) reforça a característica árida dessa estação no Cerrado. A região é predominantemente ocupada por valores normalizados mais baixos, e verificando esses valores de IA observa-se que eles são inferiores a 1, indicando um balanço hídrico negativo, ou seja, a evapotranspiração potencial supera a precipitação na estação seca, o que impõe mais pressão sobre os recursos hídricos nessas áreas. Esse resultado está alinhado com as observações de Ferreira et al. (2023), onde o balanço hídrico positivo das bacias do Cerrado ocorre apenas entre os meses de novembro e maio, sendo que em maio essa condição se restringe a poucas bacias localizadas na porção norte do bioma.

Já a distribuição espacial dos percentuais médios de área irrigada normalizados (Figura 2f) mostra que, embora a maioria das bacias do Cerrado apresente altos valores normalizados, há regiões pontuais no centro, sudeste e leste do bioma em que os percentuais médios apresentam menores valores normalizados e correspondem a regiões que superam 2,5%, chegando a valores superiores a 50% da área da bacia ocupada pela agricultura irrigada. Esse padrão reflete o avanço da irrigação nas últimas décadas, sobretudo pelo sistema pivô central. De acordo com Sano et al. (2019), esse crescimento tem ocorrido de forma acentuada principalmente nas porções central, sul, sudeste e leste do Cerrado, onde hoje já são consolidados polos de irrigação do Brasil como o Oeste da Bahia (Estado da Bahia, porção leste) e São Marcos (Estado de Goiás, porção central).

Por fim, a distribuição espacial da vegetação nativa normalizada (Figura 2g) revela que as bacias com os menores valores normalizados se concentram principalmente nas porções norte e leste, e algumas ao oeste do Cerrado e são as que apresentam uma cobertura superior a 60%. Em contrapartida, observa-se menores valores normalizados nas porções centro e sul do bioma, com várias bacias apresentando menos de 20% de suas áreas cobertas pela vegetação natural. Esse padrão reflete o avanço da urbanização e das atividades agropecuárias do Cerrado como na porção centro-sul, onde muitos dos estados que integram essa região apresentam uma diminuição significativa da proporção das áreas de vegetação nativa verificadas ao longo das últimas décadas (MAPBIOMAS, 2024).

3.2 Análise espacial do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco

A Figura 3 apresenta os resultados espacial do ISHps para as bacias do Cerrado, bem como a distribuição de frequência dos valores desse índice. Os resultados revelam uma sustentabilidade hídrica heterogênea ao longo do bioma, resultado da combinação de fatores hidrológicos, climáticos e antrópicos que afetam a dinâmica de recursos hídricos durante a estação seca no Cerrado.

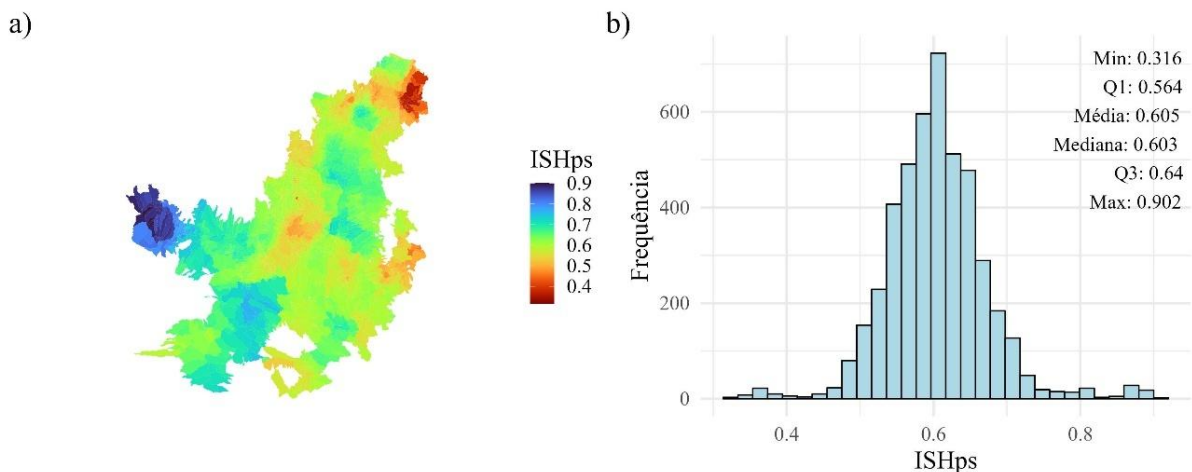


Figura 3. (a) Distribuição espacial do Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps) das bacias do bioma Cerrado e (b) distribuição de frequência dos valores de ISHps

Valores de ISHps < 0,45 foram observados em 1,3% (n = 59) das bacias do Cerrado e estão localizadas principalmente na porção norte, como, por exemplo, a bacia do Baixo Parnaíba localizada no norte da bacia do rio Parnaíba (Estados do MA e PI). Os valores do ISHps para as bacias do Baixo Parnaíba foram entre de 0,35 e 0,45, sendo um reflexo

principalmente da combinação da baixa disponibilidade hídrica ($Q_{95} < 0,04 \text{ mm dia}^{-1}$), da alta declividade da curva de permanência (S_{FDC} entre 4,2 e 9,5%), e dos altos valores de k entre 0,08 e $0,11 \text{ dia}^{-1}$.

A bacia do rio Parnaíba como um todo é caracterizada por forte contrastes sazonais de precipitação, longos períodos de estiagem e restrita capacidade de regulação hídrica, principalmente nas porções médias e baixas (CPRM, 2017). Estudos vem apontando para uma tendência de redução das chuvas e aumento da irregularidade hidrológica na região, podendo agravar a escassez nos meses mais secos, impactando o abastecimento humano e demais atividades (ABREU et al., 2019; MORAIS; ABREU, 2021).

Por outro lado, valores mais altos de ISHps, como os superiores a 0,65 ($n = 945$), foram observados em 20,9% do Cerrado. Esses valores de ISHps foram observados nas bacias localizadas principalmente nas porções oeste, sul e centro-leste do Cerrado. Entre essas bacias, tem-se a Alto da Juruena, localizada no oeste do Cerrado, mais precisamente no noroeste do estado do Mato Grosso, que apresentou bacias com altos valores de $Q_{95} (> 1,25 \text{ mm dia}^{-1})$, coeficientes de recessão inferiores a $0,03 \text{ dia}^{-1}$, participação significativa do escoamento subterrâneo no escoamento total ($BFI > 0,6$), percentuais médios de vegetação nativa superiores a 60% e baixos percentuais médios de área irrigada. A combinação desses fatores favorece a manutenção dos fluxos durante o período seco, garantindo assim uma maior resiliência hidrológica na região.

De forma geral, a maioria das bacias do Cerrado se encontra em uma faixa intermediária de sustentabilidade hídrica no período seco, apresentando ISHps entre 0,45 e 0,65 ($n = 3.534$), correspondendo a 77,8% das bacias do Cerrado. A média (0,602) e a mediana (0,603) refletem esse padrão. Esses valores concentram-se nas porções central, leste e sudeste, com algumas ao norte do bioma apresentando uma condição hidrológica moderada na estação seca. As bacias desse conjunto moderado apresentaram, no geral, valores de vazões mínimas entre 0,5 e 1 mm dia^{-1} , taxas de recessão entre 0,01 e $0,03 \text{ dia}^{-1}$ e uma participação significativa do escoamento subterrâneo (BFI entre 0,8 e 0,97), ou seja, as águas subterrâneas conferem a essas bacias mais de resiliência no período seco.

Nesse sentido, Augusto e Campos (2024) chegam a destacar o potencial hidrogeológico do Cerrado para a estação seca, até mesmo para usos consuntivos de alta demanda, como a irrigação. Contudo, os autores alertam que o uso sustentável dos aquíferos no período de estiagem só é viável em condições específicas, onde os reservatórios subterrâneos possuam grandes espessuras, elevada porosidade e recarga hídrica satisfatória. Por exemplo, a bacia do rio Grande, localizada na porção leste do Cerrado, especificamente no oeste do Estado da Bahia,

apresentou valores intermediários de ISHps (entre 0,6 e 0,69) para as bacias que a compõe, com valores de Q_{95} inferiores a $0,75 \text{ mm dia}^{-1}$ e irrigação intensa, mas o BFI superior a 0,8. Essa bacia é abastecida pelo aquífero Urucuia, considerado um sistema muito poroso com excelente capacidade de armazenamento hídrico (AUGUSTO; CAMPOS, 2024).

As águas subterrâneas desempenham um papel essencial na manutenção dos fluxos hídricos no Cerrado, principalmente no período seco. O bioma abriga importantes aquíferos, além do Urucuia tem-se o Bambuí, Entre Ribeiros e Bananal, que funcionam como reguladores naturais, sustentando o escoamento de base e garantindo a perenidade de muitos cursos d'água (AUGUSTO; CAMPOS, 2024). A contribuição das águas subterrâneas é vital para o abastecimento humano e para a expansão da agricultura irrigada, o que torna os aquíferos uma fonte estratégica de captação hídrica, compensando as menores taxas de escoamento superficial durante a estação seca em muitas bacias hidrográficas do Cerrado.

Contudo, esse padrão mais moderado das bacias do Cerrado com a forte contribuição do escoamento de base pode ser comprometido por eventos climáticos extremos ou uma expansão não planejada das atividades agrícolas realizadas ao longo dos anos. Assim, essas áreas devem possuir estratégias de gestão preventivas, como o monitoramento do uso da água superficial e subterrânea e ações de estímulo ao uso racional dos recursos hídricos, a fim de garantir uma resiliência ao longo do tempo.

Estudos como os de Rocha et al. (2013), com o índice de Falkenmark, e Conejo et al. (2009), com o Indicador de Disponibilidade Hídrica (IDHidr), avaliaram a disponibilidade hídrica do Brasil considerando o período anual, e fazendo um recorte para o Cerrado, grande parte do bioma aponta para uma boa condição hídrica, porém com algumas porções no centro, leste e nordeste do bioma, tem-se uma maior pressão sobre os recursos hídricos. Essa pressão, segundo os autores, decorre da combinação da alta concentração de atividades agropecuárias, desmatamento, condições climáticas mais secas e urbanização nessas áreas.

Para aprofundar a análise da influência antrópica da irrigação sobre a sustentabilidade hídrica do período seco no Cerrado, foi realizada a sobreposição do ISHps com os polos de irrigação do bioma (Figura 4a) e com os pivôs centrais ativos de 2019 (Figura 4b).

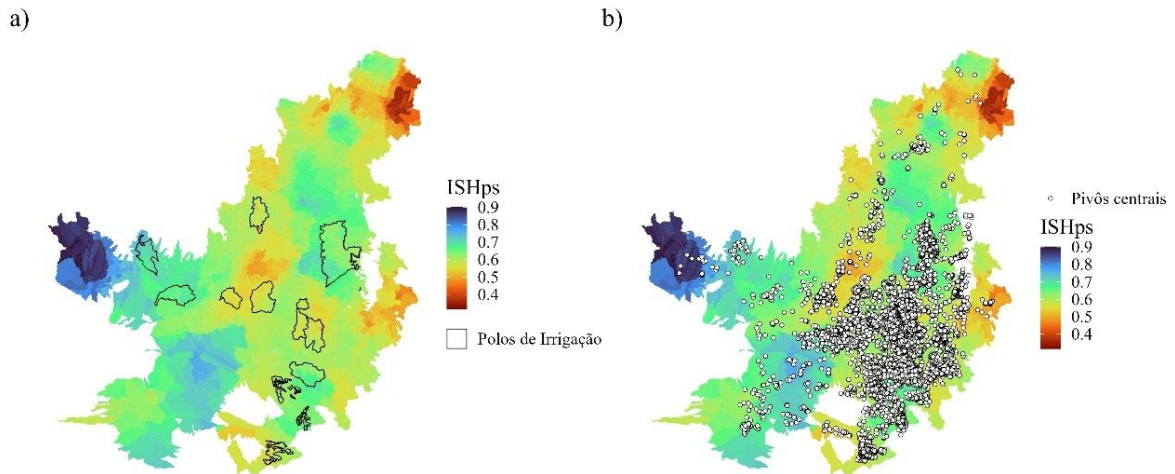


Figura 4. (a) Sobreposição do ISHps com os: polos de irrigação do Cerrado e (b) pivôs centrais ativos de 2019

Essa comparação revela que os polos de irrigação do Cerrado estão localizados em regiões com ISHps entre 0,5 e 0,75, indicando condições relativamente favoráveis durante a estação seca. Destacam-se os polos do Alto Teles Pires (MT), Alto Rio das Montes (MT) e Vertentes do Rio Pardo e Mogi Guaçu (SP), com ISHps superiores a 0,65. Essas áreas apresentam maior disponibilidade e regulação hídrica, o que favorece a prática da irrigação na estação seca. Por outro lado, alguns polos de irrigação como Javaés/Formoso (TO), Alto Araguaia (GO), Rio das Almas (GO), Alto Rio Preto (DF/GO) e Alto Paracatu/Entre Ribeiros (MG/GO) encontram-se em regiões com ISHps entre 0,45 e 0,65. Nessas áreas, a pressão sobre os recursos hídricos na estação seca é mais elevada, o que demanda maior atenção no planejamento do uso da água, como já apontado por Sano et al. (2019).

Além disso, a alta densidade de pivôs centrais na porção sudeste do Cerrado sobrepõe-se em bacias com moderada sustentabilidade hídrica, indicando uma concentração em áreas com limitações relativas durante a estação seca. Isso pode sugerir uma vulnerabilidade ao estresse hídrico nessa porção, principalmente diante de cenários de aumento da demanda por irrigação. Segundo Althoff e Rodrigues (2019), a média de tamanho dos pivôs no Cerrado tem diminuído, indicando uma fragmentação das áreas irrigadas e possível intensificação da competição pelo recurso hídrico, portanto, tal sobreposição reforça a necessidade de políticas de gestão hídrica mais restritivas nessas regiões, priorizando práticas de uso eficiente da água.

Por outro lado, porções do oeste e sul do bioma que apresentam um ISHps superior a 0,60 ainda concentram uma menor densidade de áreas irrigadas e pivôs centrais, sendo áreas de maior resiliência hidrológica no período seco, mas que ainda exigem planejamento adequado

para evitar a repetição dos padrões observados em outras regiões do Cerrado, caso essas áreas sejam destinadas a agricultura irrigada.

3.3 Regiões homogêneas dos indicadores do ISHps

Além da análise espacial do ISHps e da sobreposição desse índice com as áreas de irrigação, foi realizada uma análise de agrupamento para identificar regiões homogêneas no Cerrado considerando os indicadores que compõe o ISHps (Figura 5).

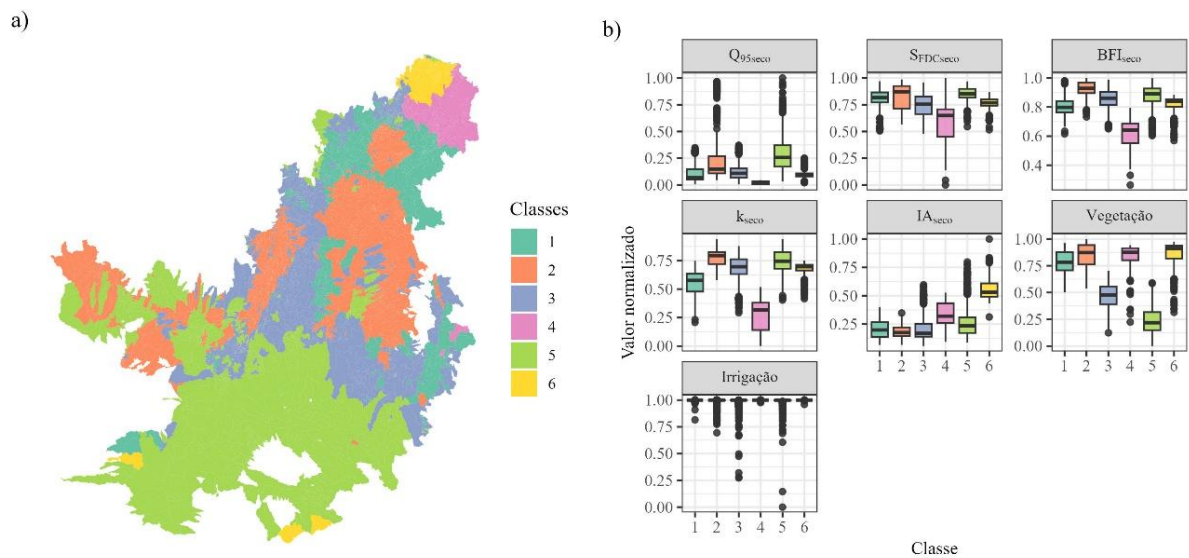


Figura 5. (a) Regiões homogêneas considerando todos os indicadores que compõe o ISHps e (b) boxplots dos indicadores do ISHps por classe

A classificação resultou em seis classes distintas de bacias, com diferentes níveis de sustentabilidade hídrica no período seco. A Classe 1 (verde-água), predominante em áreas do norte e parte do leste do bioma, reúne bacias com baixa disponibilidade e limitada regulação hídrica, conforme indicado pelos baixos valores normalizados de Q₉₅, BFI e k, tendo nessas áreas a condição climática, observada pelos baixos valores de IA, um dos principais limitantes à sustentabilidade hídrica durante a estação seca.

A Classe 2 (laranja), distribuída no oeste, centro-oeste e centro-leste do Cerrado, apresenta as melhores condições de regulação, tendo os maiores valores relativos de S_{FDC}, BFI e k. Já a Classe 3 (azul), ocupa áreas no centro do Cerrado, apresenta baixos valores relativos de vegetação e indicadores medianos de regulação, refletindo em bacias mais pressionadas por processos de urbanização e expansão agropecuária. Nessas regiões, o uso intensivo do solo e a redução da cobertura vegetal contribuem para uma menor sustentabilidade hídrica.

A Classe 4 (rosa), concentrada na porção norte do bioma, se diferencia da demais por apresentar os menores valores de Q_{95} , S_{FDC} , BFI e k , ou seja, são as bacias com a menor disponibilidade hídrica e capacidade de regulação no Cerrado na estação seca, tornando as áreas mais vulneráveis hidrológicamente, o que reflete nos baixos valores do ISHps observados nessas regiões. A Classe 5 (verde-claro), por sua vez, são as bacias com as melhores condições de disponibilidade hídrica do Cerrado na estação seca, podendo ser observado pelos maiores valores de Q_{95} , além das ótimas condições relativas à regulação conforme os indicadores S_{FDC} , BFI e k , caracterizando áreas de elevada resiliência durante a estação seca no Cerrado.

Por fim, a Classe 6 (amarelo), predominante no extremo norte do bioma, se destaca pelos baixos valores relativos de Q_{95} , S_{FDC} , BFI e k , porém são as bacias mais úmidas do Cerrado na estação seca, o que pode ser explicado pelo início tardio da estação seca nessa região conforme verificado por Ferreira et al. (2023), o que contribui para uma menor pressão hidrológica nos primeiros meses da estiagem.

3.4 Análise integrada da sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do Cerrado

A análise espacial integrada dos resultados permite uma compreensão mais ampla da sustentabilidade hídrica das bacias do Cerrado durante o período seco, considerando simultaneamente a distribuição dos valores do ISHps, os indicadores individuais e o contexto da irrigação. O mosaico de condições encontrado no bioma reflete a complexidade das interações entre fatores naturais (disponibilidade, regulação e clima) e pressões antrópicas, evidenciando contrastes marcantes entre diferentes regiões.

As bacias com os menores valores de ISHps ($< 0,40$), indicando baixa sustentabilidade hídrica, concentram-se principalmente na porção norte do bioma, principalmente em áreas como o Baixo Parnaíba (PI/MA). Nesses locais, observa-se uma combinação desfavorável de baixa disponibilidade hídrica (Q_{95}) e regulação do fluxo (valores baixos de S_{FDC} , BFI e k), indicando uma maior vulnerabilidade durante o período seco. Essas regiões apresentam riscos elevados para a manutenção de fluxos para abastecimento humano e atividades agropecuárias, exigindo maior atenção do ponto de vista da gestão hídrica. Em contraste, áreas dos Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul apresentam valores mais elevados de ISHps ($> 0,7$), evidenciando uma combinação mais favorável de fatores hidrológicos durante a estação seca. Nessas regiões, uma menor pressão da irrigação também contribui para uma maior resiliência hídrica na estação seca.

Para aprofundar essa análise espacial, foram traçados dois perfis longitudinais no Cerrado, atravessando regiões com diferentes condições hidrológicas e pressões antrópicas. A

Figura 5 mostra a variação dos sete indicadores e do ISHps ao longo dessas linhas, evidenciando a heterogeneidade dos valores e revelando transições marcantes entre bacias com alta e baixa sustentabilidade hídrica. Essas análises permitem visualizar, por exemplo, como o avanço da agricultura irrigada ocorre sobre áreas com valores decrescentes de indicadores de regulação e disponibilidade, reforçando a necessidade de se considerar a vulnerabilidade hidrológica no ordenamento territorial.

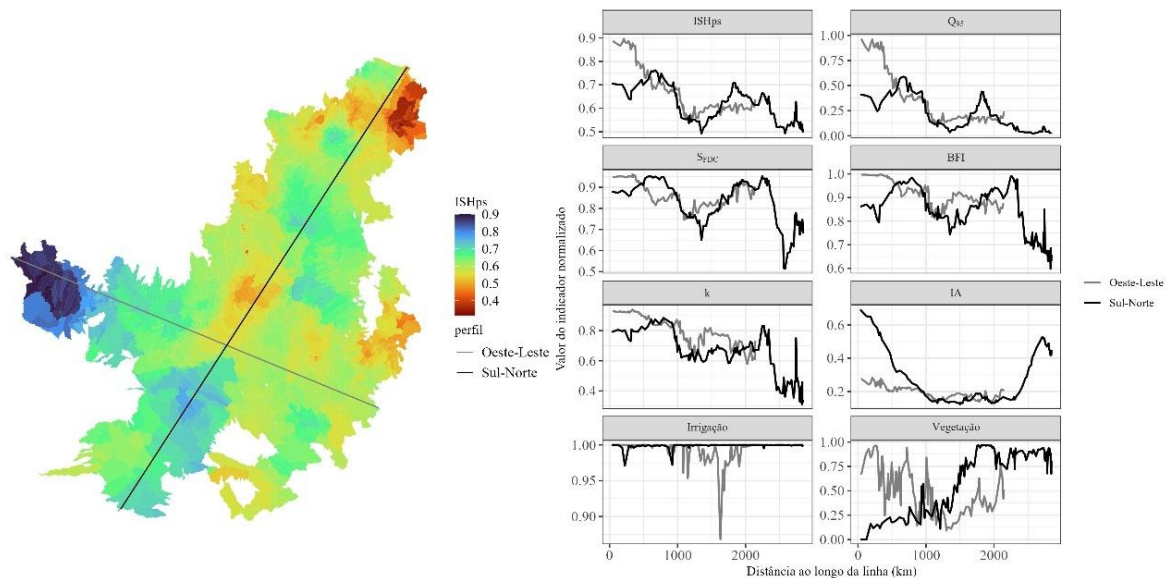


Figura 6. Variação do ISHps e dos seus indicadores ao longo dos perfis Oeste-Leste e Sul-Norte

O perfil Sul–Norte (linha preta) revela uma transição marcante entre áreas mais resilientes do sul do Cerrado e regiões vulneráveis no extremo norte. Os valores de ISHps, Q_{95} , BFI e S_{FDC} diminuem gradativamente ao longo do percurso, indicando piora nas condições de disponibilidade e regulação hídrica. Embora a cobertura vegetal aumente em direção ao norte, o índice de aridez também se eleva, e os valores de k despencam, sugerindo escoamento mais efêmero. Isso indica que a maior vegetação não é suficiente para compensar os efeitos climáticos adversos e a baixa persistência dos fluxos, conforme também discutido por Ferreira et al. (2023), que destacam o atraso no início da estação seca nessa região. Assim, o norte do Cerrado se configura como uma das áreas mais frágeis em termos de sustentabilidade hídrica no período seco.

Por outro lado, o perfil Oeste–Leste (linha cinza) apresenta um padrão distinto. A porção oeste se destaca pelos maiores valores de ISHps e Q_{95} , refletindo bacias com maior

disponibilidade hídrica superficial. Os valores elevados de S_{FDC} , BFI e k indicam boa capacidade de regulação hídrica, associada a uma cobertura vegetal ainda expressiva e menor pressão agrícola. À medida que o perfil avança para leste, observa-se queda nos valores dos indicadores hidrológicos e aumento dos percentuais de irrigação, especialmente na região central do Cerrado, sugerindo que a expansão agrícola tem avançado sobre áreas com menor resiliência hídrica. Essa sobreposição entre elevada demanda hídrica e baixa capacidade de suporte revela zonas de potencial conflito pelo uso da água e reforça a importância do ISHps como ferramenta para orientar o ordenamento territorial.

De forma geral, a análise integrada evidencia que as áreas mais sustentáveis estão concentradas no oeste e sul do bioma, onde predominam condições climáticas menos áridas, maior cobertura vegetal e melhores indicadores de regulação hidrológica. Em contrapartida, o norte e o centro-leste do Cerrado apresentam maior vulnerabilidade, combinando alta aridez, baixa disponibilidade hídrica e expansão agrícola intensiva. Essa heterogeneidade impõe desafios à gestão dos recursos hídricos e destaca a necessidade de políticas públicas regionalizadas, que considerem a fragilidade hídrica local no planejamento do uso da terra e na concessão de outorgas.

4. Conclusões

Este estudo propôs, desenvolveu e aplicou o Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps) como uma ferramenta para avaliar a sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do bioma Cerrado durante a estação seca. O ISHps integra sete indicadores representativos da disponibilidade hídrica, regulação hídrica, clima, pressão antrópica e mitigação, que influenciam nesse período crítico. Os resultados evidenciaram uma elevada heterogeneidade espacial no bioma, com áreas que variam desde alta sustentabilidade até condições menos sustentáveis.

As bacias com menores valores de ISHps concentram-se principalmente na porção norte do Cerrado, caracterizadas pela baixa disponibilidade e limitada regulação dos fluxos, demandando uma maior atenção para a gestão hídrica na estação seca. Por outro lado, regiões do oeste e sul do bioma apresentaram os maiores valores de sustentabilidade hídrica, associadas a melhores condições naturais e menor pressão antrópica, indicando áreas estratégicas para manutenção e possível expansão planejada de atividades produtivas.

Dessa forma, o ISHps se apresenta como uma ferramenta robusta e aplicável para apoiar decisões no âmbito da gestão dos recursos hídricos no Cerrado, principalmente no contexto da intensificação agrícola e das mudanças climáticas. Recomenda-se que o índice seja incorporado a estudos futuros voltados a análise de cenários e a avaliação de impactos de novas expansões irrigadas, promovendo uma gestão hídrica mais sustentável e adaptada às especificidades do bioma.

3. Conclusões gerais

Esta tese apresentou uma abordagem integrada para a avaliação hidrológica e a sustentabilidade hídrica de bacias hidrográficas do bioma Cerrado, com base em três estudos complementares. Cada artigo abordou dimensões distintas, porém interdependentes, do funcionamento hidrológico das bacias, fornecendo uma compreensão abrangente sobre os padrões, processos e vulnerabilidades da região.

O primeiro artigo evidenciou alterações significativas no regime hidrológico do bioma Cerrado ao longo das últimas décadas, impulsionadas pela interação entre variabilidade climática, mudanças no clima e alterações intensivas no uso e cobertura da terra. A análise de tendências evidenciou reduções na precipitação e nas vazões mínimas, médias e máximas em diversas bacias, com maior concentração nas porções central, leste e sudeste do bioma. Tais mudanças hidrológicas refletem uma combinação complexa de fatores naturais e antrópicos, acentuando os desafios para a gestão sustentável da água no Cerrado.

O segundo artigo aprofundou a compreensão das similaridades hidrológicas no Cerrado ao classificar as bacias hidrográficas com base em assinaturas hidrológicas que refletem distintos regimes de escoamento. A identificação de quatro classes distintas de regimes de vazão reflete padrões específicos de disponibilidade, regulação e variabilidade hídrica. Além disso, foi possível avaliar a relação dessas classes com fatores climáticos, físicos e de uso e cobertura da terra, destacando as múltiplas combinações desses fatores no comportamento das bacias hidrográficas no bioma. Portanto, as classificações hidrológicas demonstraram seu potencial como ferramenta estratégica para o planejamento, conservação e alocação hídrica no bioma.

Por fim, o terceiro artigo propôs e aplicou o Índice de Sustentabilidade Hídrica do Período Seco (ISHps), integrando indicadores hidrológicos, climáticos e antrópicos em uma única métrica. O ISHps revelou uma forte heterogeneidade espacial de sustentabilidade hídrica, com destaque para as regiões oeste e sul como áreas mais sustentáveis e a porção norte como mais vulnerável, devido à baixa disponibilidade de água e menor capacidade de regulação. A sobreposição do ISHps com áreas irrigadas também permitiu identificar zonas de potencial conflito entre oferta e demanda hídrica.

De forma abrangente, os resultados demonstram a necessidade urgente de uma gestão hídrica mais estratégica, adaptativa e regionalizada no Cerrado, capaz de equilibrar a conservação dos recursos naturais com as crescentes pressões antrópicas, principalmente diante da intensificação da agricultura irrigada e das incertezas trazidas pelas mudanças climáticas. As

abordagens adotadas neste trabalho de análise de tendência, classificação hidrológica e desenvolvimento de índice de sustentabilidade hídrica, oferecem subsídios importantes para o ordenamento territorial, formulação de políticas públicas e sustentabilidade dos usos múltiplos dos recursos hídricos no bioma Cerrado.

Referências

- ABREU, L. P.; MUTTI, P. R.; LIMA, K. C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação na bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, 2019.
- ADDOR, N.; NEARING, G.; NEWMAN, A. J.; PRIETO, C.; LE VINE, N.; CLARK, M. P. A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space. **Water Resources Research**, v. 54, n. 1, p. 8792-8812, 2018.
- ALLAN, R. P.; BARLOW, M.; BYRNE, M. P. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1472, p. 49-75, 2020.
- ALMAGRO, A.; MEIRA NETO, A. A.; VARGOPOLAN, N.; ROY, T.; TROCH, P. A.; OLIVEIRA, P. T. S. The drivers of hydrologic behavior in Brazil: insights from a catchment classification. **Water Resources Research**, v. 60, n. 8, e2024WR037212, 2024.
- ALMEIDA, A. L. S. P.; MACEDO, D. R.; SANTOS, H. A.; RIBEIRO, S. M. C.; HUGHES, R.M. Managing water resources in complex tropical basins: tailored SWAT ecohydrological modeling to the Rio das Velhas, Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 28, e33, 2023.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019.
- ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L.N. ETo-Brazil: A daily gridded reference evapotranspiration data set for Brazil (2000–2018). **Water Resources Research**, v. 56, n. 7, e2 020WR027562, 2020.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. **Applied Water Science**, v. 11, n. 176, 2021.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, N. L.; SILVA, D. D. Predicting runoff series in ungauged basins of the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Modelling & Software**, v. 149, p. 105315, 2022.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; SANO, E. E.; BETTIOL, G. M. **O clima do Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). *Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável*, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 155-184, 2024.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Codificação de bacias hidrográficas pelo método de Otto Pfafstetter**. 2012. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/7bb15389-1016-4d5b-9480-5f1acdadd0f5/attachments/Manual_Codificao_de_Bacias_de_Otto_Pfafstetter.pdf Acesso em: 08 fev 2022.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas**. Brasília, DF, Brasil. 252 p., 2013.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação: Uso da água na**

agricultura irrigada. Brasília, DF, Brasil. 130 p, 2021.

ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E.; ROSALEM, L. M. P.; YOULTON, C.; OLIVEIRA, P. T. S. Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. **Hydrological Earth Systems**, v. 23, p. 1263-1279, 2019.

ANDRADE, A. P. S.; GRZEBIELUCKAS, C. Governança hídrica: um estudo de caso em Tangará da Serra, MT, após o desabastecimento de 2016. **Interações**, v. 22, n. 3, p. 855-868, 2021.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Usinas hidrelétricas.** 2022.

ARIANO, S.; ALI, G. From river flow regime diversity to proxies for hydrologic homogeneity a Canada-wide case study. **Scientific Reports**, v. 15, 16743, 2025.

ASSINE, M. L.; MERINO, E. R.; PUPIM, F. N.; MACEDO, H. A.; SANTOS, M. G. M. The Quaternary alluvial systems tract of the Pantanal Basin, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 3, 2015.

AUGUSTO, V. A.; CAMPOS, J. E. G. **Potencial hidrogeológico do Cerrado.** In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 235–278, 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático.** Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2023.

BREIMAN, L. Random Forests. **Machine Learning**, v. 45, p. 5-32, 2001.

BULLEY, H. N. N.; MARX, D. B.; MERCHANT, J. W.; HOLZ, J. C.; AND HOLZ, A. A. A comparison of Nebraska reser voir classes estimated from watershed-based classification models and ecoregions. **Journal of Environmental Informatics**, v. 11, n. 2, p. 90-102, 2008.

CAIXETA, R. G. B.; CARNEIRO, P. A. R. **Aspectos da legislação ambiental: uma visão para o Cerrado.** In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 65–100, 2024.

CAMPOS, J. de O.; CHAVES, H. M. L. Trends and variabilities in the historical series of monthly and annual precipitation in cerrado biome in the period 1977–2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 157–169, 2020.

CAMPOS, J. E. G.; TELES, L. S. B.; MACHADO, A. M. A.; RODRIGUES, D. S. Caracterização do Aquífero entre Ribeiros, Município de Paracatu, Noroeste do estado de Minas Gerais. **ANAIS: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, São Paulo, SP, Brasil, 2022.

CHAMON, C. C.; SERRA, J. P.; CAMELIER, P.; ZANATA, A. M.; FICHBERG, I.; MARINHO, M. M. F. Building knowledge to save species: 20 years of ichthyological studies in the Tocantins-Araguaia River basin. **Biota Neotropica**, v. 22, n. 2, e20211296, 2022.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. Análise das tendências de chuva no Brasil, de 1980 a 2015. **ANAIS: XXVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2019.

- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; ADDOR, N.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A. CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. **Earth System Science Data**, v. 12, p. 2075-2096, 2020.
- CHARRAD, M.; GHAZZALI, N.; BOITEAU, V.; NIKNAFS, A. **NbClust**. R package version 3.0.1, 2022.
- CIRINO, P. H.; FÉRES, J. G.; BRAGA, M. J.; REIS, E. Assessing the Impacts of ENSO-related Weather Effects on the Brazilian Agriculture. **Procedia Economics and Finance**, v. 24, p. 146–155, 2015.
- COLMAN, C. B.; GUERRA, A.; ALMAGRO, A.; ROQUE, F. O.; ROSA, I. M. D.; FERNANDES, G. W.; OLIVEIRA, P. T. S. Modeling the Brazilian Cerrado land use change highlights the need to account for private property sizes for biodiversity conservation. **Scientific Reports**, v. 14, p. 4559, 2024.
- CONEJO, J.G. L.; MARANHÃO, N.; BURNETT, J. A. B.; ANTUNES, B. Sobre um índice de disponibilidade hídrica aplicável à gestão dos recursos hídricos. **ANAIS: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, MS, Brasil, v. 22, 2009.
- CORREA, G. O.; SILVA, F. E. O.; MATOS, A. C. S. Hydrological signatures in Brazilian catchments: a machine learning approach for spatial estimates. **Hydrological Sciences Journal**, v. 70, n. 6, p. 876-897, 2025.
- CORREIA FILHO, W. L. F.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DA SILVA JUNIOR, C. A.; SANTIAGO, D. de B. Influence of the El Niño–Southern Oscillation and the synoptic systems on the rainfall variability over the Brazilian Cerrado via Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data. **International Journal of Climatology**, v. 42, p. 3308–3322, 2022.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Relatório situacional dos recursos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do rio Parnaíba. 2017. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/sace/boletins/Parnaiba/20171116_10-20171116%20-%20103332.pdf Acesso em: 22 mar 2025.
- D’ACUNHA, B.; DALMAGRO, H. J.; ARRUDA, P. H. Z.; BIUDES, M. S.; LATHUILLIÈRE, M. J.; URIBE, M.; COUTO, E. G.; BRANDO, P. M.; VOURLITIS, G.; JOHNSON, M. S. Changes in evapotranspiration, transpiration and evaporation across natural and managed landscapes in the Amazon, Cerrado and Pantanal biomes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 346, 109875, 2024.
- DAVID, P. C.; CHAGAS, V. B.; CHAFFE, P. L. B. Uso de assinaturas hidrológicas para classificação de bacias hidrográficas do Brasil. **ANAIS: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2019.
- DOOGE, J. C. I. Hydrologic models and climate change. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D3, p. 2677-2686, 1992.
- EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. **Hierarchical Clustering**. In: SHEWHART, W. A.; WILKS, S. S. (Editores técnicos). *Cluster Analysis*. 5. ed. Wiley Series in Probability and Statistics, Hoboken, p. 71-110, 2011.

FAIZ, M. A.; LIU, D.; FU, Q.; WRZESINSKI, D.; MUNEER, S.; KHAN, M. I.; LI, T. X.; CUI, S. Assessment of precipitation variability and uncertainty of stream flow in the Hindu Kush Himalayan and Karakoram River basins of Pakistan. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 131, p. 127–136, 2019.

FALKENMARK, M.; LUNDQVIST, J.; WIDSTRAND, C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. **Natural Resources Forum**, v. 13, n. 4, p. 258-267, 1989.

FAN, Y. Groundwater in the Earth's critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes. **Water Resources Research**, v. 51, n. 5, p. 3052–3069, 2015.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSODRF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

FERRAZ, L. L.; DE SOUSA, L. F.; DA SILVA, L. S.; JESUS, R. M.; SANTOS, C. A. S.; ROCHA, F. A. Land use changes and hydrological trend analysis in a Brazilian Cerrado basin. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, p. 7469–7482, 2022.

FERRAZZI, M.; WOODS, R. A.; BOTTER, G. Climatic signatures in regulated flow regimes across the Central and Eastern United States. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 35, 100809, 2021.

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; AMORIM, R. S. S. Spatial-temporal variability of climatic water balance in the Brazilian Savannah region river basins. **Water**, v. 15, 1820, 2023.

FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N. Production viability index for annual agricultural crops. **Agricultural Systems**, v. 222, 104173, 2025.

FERREIRA, M. L.; TORMEN, G. P.; DE ANDRADE, A. M. Climate change and irrigation expansion in Northwest Minas Gerais, Brazil: the need for hydroclimatic monitoring. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, p. 5495–5512, 2025.

GUEDES, R. B.; HORA, M. A. G. M. Estudo de regionalização de vazões características e da disponibilidade hídrica na bacia do Alto Tocantins. **ANAIS: I Simpósio Internacional de Águas, Solos e Geotecnologias**, Uberaba, MG, Brasil, 2016.

GUSTARD, A.; BULLOCK, A.; DIXON, J. M. **Low flow estimation in the United Kingdom**. [S. l.]: Institute of Hydrology, 1992.

HAIR, B. B. A. T. **Análise Multivariada de dados**. Bookman Editora. 2009.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, p. 182–196, 1998.

HENGL, J. M.; HEUVELINK, G. B. M.; GONZALEZ, M. R.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIC, A.; SHANGGUAN, W.; WRIGHT, M. N.; GENG, X.; BAUER-MARSHALLINGER, B.; GUEVARA, M. A.; VARGAS, R.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; LEENAARS, J. G.

B.; RIBEIRO, E.; WHEELER, I.; MANTEL, S.; KEMPEN, B. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. **PLoS ONE**, v. 12, n. 2, e0169748, 2017.

HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVEZ, R. J. V.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; OLIVEIRA, L. F. B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, p. 4060–4073, 2021.

HOFMANN, G. S.; SILVA, R. C.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, L. F. B.; ALVES, R. J. V.; HASENACK, H.; SCHOSSLER, V.; AQUINO, F. E.; CARDOSO, M. F. Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, v. 13, p. 11236, 2023.

HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The water footprint assessment manual**. 1.ed. London: Water Footprint Network, 2011. 224p.

HUFFMAN, G. J.; STOCKER, E. F.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; TAN, J. **GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06**. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019.

HUNKE, P.; MUELLER, E. N.; SCHODER, B.; ZEILHOFER, P. The Brazilian Cerrado: assessment of water and soil degradation in catchments under intensive agricultural use. **Ecohydrology**, v. 8, p. 1154-1180, 2015.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola 2023**. [S. l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023.

KENNARD, M. J.; PUSEY, B. J.; OLDEN, J. D.; MACKAY, S. J.; STEIN, J. L.; MARSH, N. Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management. **Freshwater Biology**, v. 55, p. 177-193, 2010.

KENDALL, M. G. **Rank correlation measures**. Charles Griffin, London, 1975.

KOLLING NETO, A.; SOUZA, S. A. Assessment of the effects of land use and cover changes and climatic variability on streamflow in a Brazilian savannah basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, p. 8755–8770, 2024.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. **Gebrüder Bornträger**, v. 1, p. 1–44, 1936.

KUENTZ, A.; ARHEIMER, B.; HUNDECHA, Y.; WAGENER, T. Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification. **Hydrology Earth System**, v. 21, p. 2863-2879, 2017.

KUMAR, S.; MARWADE, V.; KAM, J.; THURNER, K. Streamflow trends in Indiana: Effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. **Journal of Hydrology**, v. 374, n.1-2, p. 171-183, 2009.

LATHUILLIÈRE, M. J.; COE, M. T.; CASTANHO, A.; GRAESSER, J.; JOHNSON, M. S. Evaluating water use for agricultural intensification in southern Amazonia using the water footprint sustainability assessment. **Water**, v.10, 349, 2018.

LIU, J.; YANG, H.; GOSLING, S. N.; KUMMU, M.; FLORKE, M.; PFISTER, S.; HANASAKI, N.; WADA, Y.; ZHANG, X.; ZHENG, C.; ALCAMO, J.; OKI, T. Water scarcity assessments in the past, present, and future. **Earth's Future**, v. 5, n. 6, p. 545-559, 2017.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245–259, 1945.

MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. Coleção 9, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/> Acesso em: 11 jan 2025.

MAPBIOMAS. Irrigação. Coleção 8, 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/> Acesso em: 17 jan 2025.

MARENGO, J. A.; JIMENEZ, J. C.; ESPINOZA, J. C. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, p. 457, 2022.

MCMILLAN, H. Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 6, p. 1393-1409, 2019.

MCMILLAN, H. K. A review of hydrologic signatures and their applications. **WIREs Water**, v. 8, n. 1, e1499, 2020.

MCMILLAN, H. K.; GNANN, S. J.; ARAKI, R. Large scale evaluation of relationships between hydrologic signatures and processes. **Water Resources Research**, v. 58, n.6, 2022.

MELO, L. S.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; SILVA, A. P. C. M. Flow distribution and trends in the Das Velhas River Basin. **Ambiente e Água**, v. 14, n. 3, 2019.

MELO, M. T. de; MIRANDA DE QUEIROZ, T.; OLIVEIRA ARONI, B. Characterization of sources, uses and perception of water quality by indigenous people in Tangará da Serra. **Caderno CRH**, v. 36, e023007, 2023.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTERNMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. Climate change: Stationarity is dead: Whither water management? **Science**, v. 319, p. 573–574, 2008.

MORAIS, R. C. S.; ABREU, L. P. Análise espacial da variabilidade de precipitação na bacia hidrográfica do rio Parnaíba, nordeste de Brasil. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 2, n. 2, 0.03-18, 2021;

MUDBHATKAL, A.; RAIKAR, R. V.; VENKATESH, B.; MAHESHA, A. Impacts of climate change on varied river-flow regimes of southern India. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 22, p. 1–13, 2017.

NAKAGAWA, K.; AMANO, H.; BERNDTSSON, R.; TAKAO, Y.; HOSONO, T. Use of sterols to monitor surface water quality change and nitrate pollution source. **Ecological Indicators**, v. 107, 105534, 2019.

NOAA/CPC – National Oceanic and Atmospheric Administration / Climate Prediction Center. Ocean Niño Index. NOAA/CPC, 2024. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php Acesso

em: 20 mar 2024.

NÓBREGA, R. L.; GUZHA, A.; TORRES, G. N.; KOVACS, K.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E.; GEROLD, G. Effects of conversion of native cerrado vegetation to pasture on soil hydro-physical properties, evapotranspiration and streamflow on the Amazonian agricultural frontier. **PLoS ONE**, v. 12, n. 6, e0179414, 2017.

OLDEN, J. D.; KENNARD, M. J.; PUSEY, B. J. A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology. **Ecohydrology**, v. 5, p. 503-518, 2012.

PELICICE, F. M.; AGOSTINHO, A. A.; AKAMA, A.; ANDRADE FILHO, J. D.; AZEVEDO-SANTOS, V. M.; BARBOSA, M. V. M.; BINI, L. M.; BRITO, M. F. G.; CANDEIRO, C. R. A.; CARAMASCHI, E. P.; CARVALHO, P.; CARVALHO, R. A.; CASTELLO, L.; CHAGAS, D. B.; ET AL. Large-scale Degradation of the Tocantins-Araguaia River Basin. **Environmental Management**, v. 68, p. 445-452, 2021.

PENEREIRO, J. C.; MARTINS, L. L. S.; BERETTA, V. Z. Identificação de variabilidades e tendências interanuais em medidas hidro-climáticas na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 219-241, 2016.

PEREIRA, D. R.; OLIVEIRA, A. R.; COSTA, M. S.; RAMOS, T. B.; ROLINIC, M.; NEVES, R. J. J. Evaluation of precipitation products in a Brazilian watershed: Tocantins-Araguaia watershed case study. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, p. 7845-7865, 2024.

PETTITT, N. A. A non-parametric approach to change point problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979.

PFRAFSTETTER, O. **Classificação de bacias hidrográficas: metodologia de codificação**. Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), Rio de Janeiro, 1989.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG, J. C. The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. **BioScience**, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.

POMPEU, J.; ASSIS, T. O.; OMETTO, J. P. Landscape changes in the Cerrado: Challenges of land clearing, fragmentation and land tenure for biological conservation. **Science of the Total Environment**, v. 906, p. 167581, 2024.

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A.; CASTRO, M. Climate change and intense irrigation growth in Western Bahia, Brazil: The urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v. 11, p. 933, 2019.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; NOVAES, L. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. F. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na Bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 199-210, 2007.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. *E-book*. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

REBOITA, M. S.; FERREIRA, G. W. S. **Sistemas de tempo e mecanismos de variabilidade climática no Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). *Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável*, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 102–154, 2024.

RIBEIRO, M. E.; ANDERSON BORTOLIN, T.; ABRITTA MENDES, L.; DE CARVALHO SOUZA SANTA RITA, L. Análise de Séries Hidrológicas na Bacia Hidrográfica afluyente à Usina Hidrelétrica Castro Alves, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 2042–2058, 2021.

ROCHA, G. C.; ROMÁN-SÁNCHEZ, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; LINO, J. S. Aspectos físicos e sociais da geografia da disponibilidade hídrica municipal no Brasil. **Irriga**, v. 18, n. 3, p. 402-414, 2013.

RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; SANTANA, N. C. FARIAS, D. B. S. **Agricultura irrigada no Cerrado: oportunidades e desafios**. In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). *Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável*, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 25-40, 2024.

ROY, P. S.; RAMACHANDRAN, R. M.; PAUL, O.; THAKUR, P. K.; RAVAN, S.; BEHERA, M. D.; SARANGI, C.; KANAWADE, V. P. Anthropogenic land use and land cover changes - a review on its environmental consequences and climate change. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 50, p. 1615–1640, 2022.

SALMONA, Y. B.; MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; SILVA, J. F. A.; COELHO FILHO, O. A.; PEDLOWSKI, M. A.; SAMPAIO, J. M.; CASTRILLÓN, L. C. R.; BRANDÃO, R. A.; SILVA, A.L.; SOUZA, S. A. A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. **Sustainability**, v. 15, p. 4251, 2023.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO JR, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHULER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

SANO, E. E.; MAGALHÃES, I. A. L.; RODRIGUES, L. N.; BOLFE, É. L. Spatio-temporal dynamics of center pivot irrigation systems in the Brazilian tropical Savanna (1985–2020). **Water**, v. 16, p. 1897, 2024.

SANTANA, N. C.; RODRIGUES, L. N. **O bioma Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). *Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável*, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 41–61, 2024.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Embrapa, Brasília, 2018.

SANTOS, A. B.; COSTA, M. H.; MANTOVANI, E. C.; BONINSENHA, I.; CASTRO, M. A remote sensing diagnosis of water use and water stress in a region with intense irrigation growth in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, p. 3725, 2020.

SAWICZ, K.; WAGENER, T.; SIVAPALAN, M.; TROCH, P. A.; CARRILLO, G. Catchment

classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern US. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 2895-2911, 2011.

SCANLON, B. R.; RUDELL, B. L.; REED, P. M.; HOOK, R. I.; ZHENG, C.; TIDWELL, V. C.; SIEBERT, S. The food-energy-water nexus: transforming science for Society. **Water Resources Research**, v. 53, n. 5, p. 3550-3556, 2017.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379-1389, 1968.

SIDDIQUI, S. F.; ZAPATA-RIOS, X.; TORRES-PAGUAY, S.; ENCALADA, A. C.; ANDERSON, E. P.; ALLAIRE, M.; DORIA, C. R. C.; KAPLAN, D. A. Classifying flow regimes of the Amazon basin. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, n. 5, p. 1005-1028, 2021.

SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F.; ALMEIDA, R. S. R.; HOLANDA, R. M.; CAMPOS, J. H. B. C. Shannon information entropy for assessing space-time variability of rainfall and streamflow in semiarid region. **Science of the Total Environment**, v. 544, p. 330-338, 2016.

SILVA, F. B.; ALMEIDA, L. T. de; VIEIRA, E. de O.; SILVA, D. D.; MACIEL, I. P.; PARMA JÚNIOR, F. Pluviometric and fluviometric trends in association with future projections in areas of conflict for water use. **Journal of Environmental Management**, v. 271, p. 110991, 2020.

SILVA, L. S.; FERRAZ, L. L.; SOUSA, L. F.; SANTOS, C. A. S.; ROCHA, F. A. Trend in hydrological series and land use changes in a tropical basin at Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v.56, n. 4, 2021.

SILVA, D. C. C. da; OLIVEIRA, R. A.; SIMONETTI, V. C.; TONIOLO, B. P.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Creation of an environmental sustainability index for water resources applied to watersheds. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, p. 11285-11305, 2023.

SILVA, M. F.; REMÉDIO, M. J.; SILVA, M. P.; CARNEIRO, J. S. M.; ARAÚJO, J. C. S.; RIZZOTTO, G. J.; PEREIRA, I. **Geologia do Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 185-234, 2024.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; MEIRA NETO, A. A.; RODRIGUES, D. B. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, 2021.

SOARES, L. S.; LOPES, W. G. R.; CASTRO, A. C. L.; SILVA, E. V.; ARAÚJO, G. C.; MOREIRA, M. S.; FRANÇA, V. L.; MENDES, K. C. Analysis of spatiotemporal changes in land use and land cover in sub-watersheds of the lower Itapecuru River in the State of Maranhão, Brazil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 34, p. 55-67, 2017.

SOUZA, A. S. de; REIS, D. S. Trend detection in annual streamflow extremes in Brazil. **Water**, v. 14, p. 1805, 2022.

SULLIVAN, C. Calculating a Water Poverty Index. **World Development**, v. 30, n. 7, p. 1195-1210, 2002.

SULLIVAN, C. A.; MEIGH, J. R.; GIACOMELLO, A. M. The water poverty index: development and application at the community scale. **Natural Resources Forum**, v. 27, p. 189-199, 2003.

TAVASSOLI, H. R.; TAHERSHAMSI, A.; ACREMAN, M. Classification of natural flow regimes in Iran to support environmental flow management. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, p. 517-529, 2014.

TEIXEIRA, A. L. de F.; BHADURI, A.; BUNN, S. E.; AYRIMORAES, S. R. Operationalizing water security concept in water investment planning: Case study of São Francisco river basin. **Water**, v. 13, p. 3658, 2021.

TEIXEIRA, A. S.; VIEIRA, L. L. C. G.; SOUZA, C. A.; BERNANRDI, J. V. E.; MONTEIRO, L. C. Evidence of water surface and flow reduction in the main hydrographic basin of the Brazilian savannah (Cerrado biome): the Araguaia river. **Hydriobiologia**, v. 851, p. 2503-2518, 2024.

THOM, H. C. S. **Some of methods of climatological analysis**. World Meteorological Organization, Geneva, 1966.

VANHAM, D.; HOEKSTRA, A. Y.; WADA, Y.; BOURAOUI, F.; ROO, A.; MEKONNEN, M. M.; BUND, W. J.; BATELAAN, O.; PAVELIC, P.; BASTIAANSEN, W. G. M.; KUMMU, M.; ROCKSTROM, J.; LIU, J.; BISSELINK, B.; RONCO, P. PISTOCCHI, A.; BIDOGLIO, G. Physical water scarcity metrics for monitoring progress towards SDG target 6.4: An evaluation of indicator 6.4.2 “Level of water stress”. **Science of The Total Environment**, v. 613-614, p. 218-232, 2018.

VARELLA, J. L.; QUADRELLI, G. Redes Neurais e análise de potência. **Revista de Tecnologia Aplicada**, v. 6, n. 3, 2017.

VIEIRA, R. M. da S. P.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; POLIZEL, S. P.; OMETTO, J. P. H. B.; SANTOS, F. C.; FERREIRA, Y. C.; TOLEDO, P. M. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. **Science of the Total Environment**, v. 782, p. 146900, 2021.

VELOSO, M. F.; RODRIGUES, L. N.; OTTONI, M. V. **Funções de pedotransferência para a estimativa de parâmetros físico-hídricos do solo do bioma Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N. (Editor técnico). Agricultura Irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável, 2. ed. Embrapa, Brasília, p. 400–419, 2024.

WANG, X.; LIU, L. The Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle and Water Resource Management. **Water**, v. 15, p. 2342, 2023.

WEF – World Economic Forum. **The Cerrado: production and protection**. Geneva, Suíça. 42 p., 2025.

WMO – World Meteorological Organization. **Manual on low-flow estimation and prediction**. Koblenz, Alemanha, 2008.

WOLFE, J. D.; SHOOK, K. R.; SPENCE, C.; WHITFIELD, C. J. A watershed classification approach that looks beyond hydrology: application to a semi-arid, agricultural region in Canada. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, p. 3945-3967, 2019.

YANG, D.; YANG, Y.; XIA, J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. **Geography and Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 115-122, 2021.

YILMAZ, M.; TOSUNOĞLU, F. Non-stationary low flow frequency analysis under climate change. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, p. 7479–7497, 2024.

YUAN, C.; YANG, H. Research on k-value selection method of k-means clustering algorithm. **Multidisciplinary Scientific Journal**, v. 2. n. 2, 2019.

ZENG, Z.; LIU, J.; SAVENIJE, H. H. G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality. **Ecological Indicators**, v. 34, p. 441-449, 2013.

ZHENG, J.; ZHOU, Z.; LIU, J.; YAN, Z.; CHONG-YU, X.; JIANG, Y.; JIA, Y.; WANG, H. A novel framework for investigating the mechanisms of climate change and anthropogenic activities on the evolution of hydrological drought. **Science of The Total Environment**, v. 900, 165685, 2023.