

**FERNANDA LAURINDA VALADARES FERREIRA**

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA E APTIDÃO DA AGRICULTURA DE  
SEQUEIRO E IRRIGADA NO 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

Coorientadores: Daniel Althoff

Ricardo Santos Silva Amorim

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2023**

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

T

F383d  
2023  
Ferreira, Fernanda Laurinda Valadares, 1994-  
Disponibilidade hídrica e aptidão da agricultura de sequeiro  
e irrigada no Cerrado / Fernanda Laurinda Valadares Ferreira. –  
Viçosa, MG, 2023.  
1 tese eletrônica (104 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.  
Referências bibliográficas: f. 92-104.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.782>

1. Desenvolvimento de recursos hídricos - Modelos matemáticos. 2. Irrigação agrícola. 3. Ottobacias. 4. Bacias hidrográficas. 5. Balanço hidrológico. 6. Savanas. 7. Vazões naturais. 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

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552


**FERNANDA LAURINDA VALADARES FERREIRA**

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA E APTIDÃO DA AGRICULTURA DE  
SEQUEIRO E IRRIGADA NO 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: 26 de julho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 **FERNANDA LAURINDA VALADARES FERREIRA**  
Data: 22/12/2023 11:33:33-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Fernanda Laurinda Valadares Ferreira  
Autor

Documento assinado digitalmente  
 **LINEU NEIVA RODRIGUES**  
Data: 22/12/2023 10:42:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Lineu Neiva Rodrigues  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que sempre esteve comigo, me sustentou nos momentos difíceis e me levou a chegar até aqui.

À minha família e aos meus pais, por todo amor e pela contribuição na minha educação, sempre acreditaram no meu potencial e me incentivaram.

Aos meus irmãos e companheiro, pelo amor, amizade e companheirismo em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de aperfeiçoamento da minha formação acadêmica.

Ao Lineu, pelo apoio, orientação, ensinamentos e confiança.

Ao Daniel e Ricardo, pela coorientação e apoio.

Aos meus amigos Mariana e Robson pelo apoio imensurável nessa trajetória.

Às minhas amadas amigas-irmãs, Isabelle e Adelaide, pela amizade, convívio e inúmeras risadas.

Aos amigos integrantes da pós-graduação na área de Recursos Hídricos e Ambientais, agradeço a convivência compartilhada, os ensinamentos e apoio. Em especial, a Tarci, Mila, Rá, Erli, David, Lau, Josi, Cris<sup>2</sup>, Lu, Ligia, Pri, Arnaldo, Roberto, Micael, Diego e Jesi.

A todos os meus amigos que, mesmo de longe, foram essenciais nessa caminhada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos – Código de Financiamento 001.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, o meu sincero agradecimento.

*“Poucos rios, surgem de grandes nascentes, mas  
muitos crescem recolhendo filetes de água”  
(Ovídio)*

## RESUMO

FERREIRA, Fernanda Laurinda Valadares, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Disponibilidade hídrica e aptidão da agricultura de sequeiro e irrigada no Cerrado.** Orientador: Lineu Neiva Rodrigues. Coorientadores: Daniel Althoff e Ricardo Santos Silva Amorim.

A escassez hídrica vem se acentuando em diversas regiões do mundo, ocasionada em grande parte pelas mudanças climáticas, crescimento populacional, uso ineficiente da água e à falta de planejamento e gestão de recursos hídricos. Esse cenário de aumento da escassez hídrica evidencia a importância de melhorar o aproveitamento dos recursos hídricos, o que implica necessariamente em estabelecer estratégias de planejamento e gestão de recursos hídricos mais efetivas, que garantam uma alocação do recurso que favoreça aos usos múltiplos e traga segurança hídrica, de forma a assegurar o bem-estar social da população e o desenvolvimento sustentável da região. Nesse contexto, é fundamental que se tenha ferramentas que subsidie o gestor com informações que o auxilie no processo de tomada de decisão e possibilite um crescimento mais organizado e sustentável da agricultura na região. O objetivo geral desta tese, estruturada em forma de artigos, foi avaliar a disponibilidade hídrica e a aptidão da agricultura de sequeiro e irrigada na região do Cerrado brasileiro. No primeiro artigo, avaliou-se o impacto da aplicação de diferentes critérios de outorga anuais e sazonais, adotados nos estados que compõem o Cerrado, na disponibilidade hídrica potencial de bacias hidrográficas. Neste primeiro artigo, a área potencialmente irrigável, considerando cada um dos critérios de outorga avaliados, foi estimada. Os resultados indicam que, em média, nas ottobacias nível 5 do Cerrado, a disponibilidade hídrica potencial da Q90 anual foi 8% maior que a Q95 anual e 22% maior que Q7,10 anual. Em termos sazonais, as maiores vazões mínimas de referência mensal ocorreram em março, e o mês de menor disponibilidade foi outubro. Em relação ao potencial de área irrigável, considerando os critérios de outorga para o mês de maior disponibilidade, em comparação com o critério anual, observou-se um incremento de 142,5% na Q7,10, 130% na Q90 e 121,2% na Q95. No segundo artigo, avaliou-se o déficit e o excesso hídrico mensal provável nas bacias hidrográficas do Cerrado, bem como a tendência dos dados mensais do balanço hídrico climatológico e de suas variáveis de entrada e saída, como a precipitação e a evapotranspiração de referência na região de estudo. Os resultados evidenciaram a alta variabilidade na precipitação anual e evapotranspiração em todo o território do Cerrado. As ottobacias localizadas na área de transição entre o Cerrado e o bioma Amazônia geralmente apresentaram meses com excedente hídrico, enquanto as ottobacias ao Leste e Nordeste do

Cerrado, área de transição com a Caatinga, possuem déficit hídrico em todos os meses, com maior déficit nos meses de estiagem, de maio a outubro. Além disso, foram identificadas tendências significativas no balanço hídrico climatológico em diferentes meses. Essas tendências foram em geral de redução, as quais estão relacionadas às tendências das variáveis de redução da precipitação e/ou aumento da evapotranspiração de referência utilizadas na estimativa do balanço hídrico climatológico. No terceiro artigo, o objetivo foi desenvolver um índice de viabilidade para produção de culturas anuais, tomando como base os fatores que interferem na demanda hídrica da cultura, e aplicá-lo para a cultura da soja na região do Cerrado brasileiro. O desenvolvimento do índice de viabilidade para produção de culturas agrícolas anuais permite analisar dentro de uma região as áreas com maior aptidão ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro ou irrigada. A viabilidade da produção de soja no Cerrado é mais favorável nas regiões Noroeste, Norte e Nordeste com início nos meses de outubro e novembro, com outubro apresentando um desempenho ligeiramente superior. Em relação ao plantio da soja nos meses de setembro e outubro, a região Central não apresentou diferença significativa, mas observou-se que nessa região o plantio da soja em setembro é mais adequado que o plantio em novembro. Nas regiões Leste, Sudeste, Sudoeste e Oeste, o plantio em setembro é a opção mais vantajosa em comparação com outubro e novembro, destacando-se que outubro é o mês com maior aptidão para o cultivo de soja nesses locais.

Palavras-chave: Área potencial irrigável. Aptidão agrícola. Estacionariedade. Ottobacias. Recursos hídricos. Savana. Vazão mínima de referência.

## ABSTRACT

FERREIRA, Fernanda Laurinda Valadares, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2023. **Water availability and rainfed and irrigated agriculture suitability in the Cerrado.** Adviser: Lineu Neiva Rodrigues. Co-advisers: Daniel Althoff and Ricardo Santos Silva Amorim.

Water scarcity is intensifying in various regions of the world, largely due to climate change, population growth, inefficient water use, and a lack of planning and management of water resources. This scenario of increasing water scarcity underscores the importance of improving the utilization of water resources. This necessarily involves establishing more effective strategies for planning and managing water resources, ensuring an allocation of resources that favors multiple uses and provides water security. This is crucial for ensuring the social well-being of the population and the sustainable development of the region. In this context, it is essential to have tools that provide managers with information to aid in the decision-making process and enable more organized and sustainable growth of agriculture in the region. The overall objective of this thesis, structured in the form of articles, was to assess water availability and the suitability of rainfed and irrigated agriculture in the Brazilian Cerrado region. In the first article, the impact of applying different annual and seasonal water allocation criteria, adopted in the states that make up the Cerrado, on the potential water availability of river basins was evaluated. The potentially irrigable area, considering each of the assessed allocation criteria, was estimated. The results indicate that, on average, in Cerrado level 5 river basins, the potential water availability of the annual Q90 was 8% higher than the annual Q95 and 22% higher than the annual Q7.10. In seasonal terms, the highest minimum reference flows occurred in March, and the month with the lowest availability was October. Regarding the potential irrigable area, considering the allocation criteria for the month of highest availability compared to the annual criterion, there was an increase of 142.5% in Q7.10, 130% in Q90, and 121.2% in Q95. In the second article, the monthly probable water deficit and excess in the Cerrado river basins were assessed, along with the trend of monthly data from the climatological water balance and its input and output variables, such as precipitation and reference evapotranspiration in the study region. The results highlighted high variability in annual precipitation and evapotranspiration across the Cerrado territory. River basins located in the transition area between the Cerrado and the Amazon biome generally showed months with water surplus, while basins to the east and northeast of the Cerrado, in transition with the

Caatinga biome, experienced water deficit in all months, with higher deficits in the dry months from May to October. Additionally, significant trends in the climatological water balance were identified in different months, generally showing reduction trends related to decreased precipitation and/or increased reference evapotranspiration used in estimating the climatological water balance. In the third article, the objective was to develop a viability index for the production of annual crops, based on factors influencing crop water demand, and apply it to soybean cultivation in the Cerrado region. The development of the viability index for annual crops allows for the analysis of areas within a region with higher suitability for rainfed or irrigated agriculture. The viability of soybean production in the Cerrado is more favorable in the northwest, north, and northeast regions starting in October and November, with October showing slightly better performance. In terms of soybean planting in September and October, the Central region showed no significant difference, but it was observed that in this region, planting soybeans in September is more suitable than planting in November. In the east, southeast, southwest, and west regions, planting in September is the most advantageous option compared to October and November, with October being the month most suitable for soybean cultivation in these areas.

Keywords: Potential irrigable area. Agricultural suitability. Stationarity. Ottobasins. Water resources. Savanna. Minimum reference flow.

## SUMÁRIO

1. Introdução geral.....	10
2. Artigos científicos .....	13
2.1 Artigo 1 .....	13
1. Introdução.....	13
2. Material e Métodos.....	16
3. Resultados e Discussão .....	21
4. Conclusões .....	38
5. Recomendação .....	39
2.2 Artigo 2 .....	40
1. Introdução .....	40
2. Material e Métodos .....	43
3. Resultados e Discussão .....	46
4. Conclusões .....	62
2.3 Artigo 3 .....	63
1. Introdução .....	63
2. Material e Métodos .....	66
3. Resultados e Discussão .....	76
4. Conclusões .....	89
3. Conclusões gerais .....	91
Referências .....	92

## 1. Introdução geral

A sustentabilidade dos recursos hídricos está relacionada tanto à disponibilidade quantitativa quanto qualitativa. Sendo o equilíbrio dinâmico diretamente relacionado a oferta e a demanda por água, de modo que os mananciais sejam utilizados a taxas iguais ou inferiores a sua resiliência (ROCHA; LIMA, 2020).

O Cerrado é a principal fronteira agrícola do país, respondendo por cerca de 45% da área agrícola nacional, com destaque para a produção de bovinocultura, soja, cana-de-açúcar, milho e algodão (BOLFE et al, 2020; CONAB, 2018; IBGE, 2023). Considerando a dinâmica de recursos hídricos do Brasil, o bioma Cerrado contribui para a vazão de oito das doze regiões hidrográficas do país (ALTHOFF; RODRIGUES, 2023).

O potencial de desenvolvimento da agricultura no Cerrado é notável. Dos seus 204 milhões de hectares, cerca de 70% possuem aptidão para atividade agrícola (FRANCISCO; KAPPES, 2012). Portanto, a intensificação da agricultura nessa região, pode ser uma alternativa para atender à crescente demanda por alimentos. Uma abordagem estratégica para mitigar os desequilíbrios no ecossistema é a intensificação das práticas agrícolas em áreas já cultivadas, incluindo pastagens degradadas (SPERA, 2017). Além disso, é essencial melhorar a gestão e o planejamento dos recursos naturais locais.

As perspectivas para os próximos anos indicam um aumento de 45% na área atualmente irrigada (ANA, 2017). Nesse contexto, a agricultura irrigada, que é a principal usuária de recursos hídricos no Brasil, apresenta-se como uma das técnicas mais promissoras para o desenvolvimento agrícola. No entanto, o maior desafio reside em conciliar a expansão da agricultura irrigada com a disponibilidade de recursos hídricos, especialmente nas regiões que já enfrentam escassez hídrica (RODRIGUES, 2017).

A escassez hídrica tem se acentuado nos últimos anos em várias regiões do mundo. Esse fato ocorre principalmente, em virtude das mudanças climáticas que afetam diretamente o ciclo hidrológico, do aumento populacional, do uso ineficiente dos recursos hídricos, e da falta de planejamento e gestão (BROWN et al., 2019; BUREK et al., 2016; GOSLING et al., 2016; MUNIA et al., 2016; SALIS et al., 2017). De acordo com Baggio et al. (2021), estima-se que até o ano de 2050, 87 de 180 países terão escassez de água. Esse aumento da escassez hídrica tem se tornado cada vez mais desafiador para o desenvolvimento sustentável global (FRANCO, 2020; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016).

As mudanças que ocorrem no ciclo hidrológico podem ter um impacto direto nas chuvas (quantidade, periodicidade e duração), nas taxas de evaporação, na temperatura, no escoamento e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica, (SANTOS et al., 2021; RÁPALO et al., 2021).

A avaliação dos ciclos da água e energia por meio da estimativa do balanço hídrico não só permite compreender a dinâmica das bacias hidrográficas em relação a essas mudanças (MOREIRA et al., 2019), mas também é um instrumento essencial para avaliar o potencial hídrico de uma região (ANA, 2017b). O entendimento do balanço hídrico, mesmo que de forma simplificada, desempenha um papel importante na compreensão dos processos de degradação e conservação dos recursos hídricos (SOUZA et al., 2017).

De acordo com Berghuijs et al. (2014), o balanço hídrico realizado de forma sazonal deixa uma marca nas características da variabilidade da vazão ao longo do tempo, abrangendo uma ampla gama de condições, desde vazões mínimas até vazões máximas. Em geral, o balanço hídrico sazonal tem se mostrado uma medida de similaridade que conecta as respostas hidrológicas de curto prazo à adaptação da paisagem ao clima de longo prazo.

Uma outra forma de conhecimento da dinâmica hídrica das bacias hidrográficas, é através da outorga de uso da água, que é um dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos no Brasil, conforme a Lei Federal Nº 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997), cujo objetivo é garantir o controle tanto qualitativo quanto quantitativo dos usos da água. A outorga assegura aos usuários o acesso a esse recurso, regulamentando seu uso em uma determinada bacia hidrográfica (ANA, 2011).

No Brasil, o critério de outorga ou vazão máxima outorgável é baseado nas vazões mínimas de referência e na definição de limites percentuais para o uso dessas vazões, os quais garantem a disponibilidade de água no curso de água. A determinação das vazões de referência é feita por meio da análise de períodos mais críticos de estiagem (FINKLER et al., 2015). As vazões mínimas de referência são as vazões de elevada permanência no tempo, sendo as mais utilizadas a Q95 e Q90 (vazões com 95 a 90% de permanência no tempo), e a Q7,10 que é a menor vazão média consecutiva de sete dias que ocorreria uma vez considerando um período de retorno de 10 anos (ANA, 2011; GOMES; FERNANDES, 2017; OLIVEIRA et al., 2017; RAMOS et al., 2021).

Para o planejamento eficiente, é essencial compreender como esses diversos critérios de vazões mínimas de referência afetam a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica (SMAKHTIN, 2001), já que podem refletir nas estratégias de expansão de atividades econômicas, como a agricultura irrigada. Outras vazões de referência para a outorga têm sido consideradas, como a outorga sazonal, baseada num valor de vazão de referência por mês ou por período do ano, o que pode minimizar situações de conflitos em diferentes regiões e melhor aproveitamento dos recursos, levando sempre em consideração a variabilidade regional e sazonal (HANNAFORD; BUYS, 2012).

Diante das dificuldades enfrentadas frente as mudanças do clima e o atual cenário de uso da água na região do Cerrado, torna-se fundamental identificar áreas onde a produção agrícola possa ser realizada com maior produtividade de uso da água. Além disso, é de extrema relevância a identificação de regiões mais propícias ao desenvolvimento da agricultura sustentável, seja de sequeiro ou irrigada, considerando as melhores épocas, variedades e rotação de cultura. Nesse sentido, é necessário avaliar e aprimorar as ferramentas que auxiliam a gestão dos recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica.

A tese, cujo objetivo geral foi avaliar a disponibilidade hídrica e a aptidão da agricultura de sequeiro e irrigada em bacias hidrográficas do Cerrado brasileiro, foi estruturada na forma de artigos. O primeiro e segundo artigo referem-se à disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas do Cerrado em base mensal. O primeiro artigo se concentra na avaliação da disponibilidade hídrica em relação ao critério de outorga adotado no bioma, bem como na determinação da área potencial irrigável, considerando cada critério de outorga analisado. O segundo artigo, por sua vez, apresenta uma avaliação da disponibilidade hídrica com base no balanço hídrico climatológico (BHC), além de examinar as tendências nos dados mensais do BHC e suas variáveis de entrada, como precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região de estudo. O terceiro artigo se concentra no desenvolvimento e aplicação, no contexto do Cerrado, de um índice de viabilidade de produção de culturas anuais, levando em consideração os fatores que influenciam a demanda hídrica das culturas e a disponibilidade hídrica na região. De forma geral, esses artigos contribuem significativamente para a gestão e planejamento dos recursos hídricos no bioma do Cerrado, além de promover o desenvolvimento sustentável da região. Isso ocorre, pois eles permitem uma avaliação comparativa da capacidade das diferentes regiões em produzir alimentos, especialmente no Cerrado, que é reconhecido como a principal fronteira agrícola do país.

## 2. Artigos científicos

### 2.1 Artigo 1

#### **Avaliação dos impactos dos critérios de outorga na disponibilidade de água para irrigação no Cerrado brasileiro**

**Resumo:** Diante da demanda crescente pelo uso da água e os conflitos relacionado ao seu uso, é necessário identificar formas de otimizar seu uso sem impor riscos de escassez hídrica. A disponibilidade hídrica, avaliada em função das vazões de referência ocorridas naturalmente nos mananciais, representada pelas menores vazões em um dado período, é utilizada como critério para outorga de uso da água. Dessa forma, os objetivos desse estudo foi avaliar o impacto da aplicação de diferentes critérios de outorga ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$ ) anual e sazonal adotados no Brasil na disponibilidade hídrica potencial para irrigação nas bacias hidrográficas do Cerrado, e estimar a área potencial irrigável considerando cada um dos critérios de outorga avaliados. Aplicou-se os diferentes critérios de outorga em cada uma das 4.531 ottobacias (nível 5) do Cerrado para comparar as vazões disponíveis para serem outorgadas entre os diferentes critérios. Entre os critérios anual e sazonal avaliou-se a diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica potencial na vazão para outorga e estimou-se a área irrigável nas ottobacias do Cerrado. As ottobacias do Cerrado apresentaram em média a  $Q_{90}$  anual superior em 8% em relação a  $Q_{95}$  anual e 22% superior a  $Q_{7,10}$  anual. O uso da vazão sazonal de referência no mês de março em relação ao anual, por exemplo, proporcionou um aumento da disponibilidade hídrica em 142% para  $Q_{7,10}$ ; 121% para  $Q_{95}$ ; e 130% para  $Q_{90}$ , sendo este aumento na área irrigada de 11.149.021 ha, 10.364.311 ha e 12.293.739 ha, para cada critério, respectivamente. A utilização do critério sazonal, além de permitir um potencial aumento do uso dos recursos hídricos no período de maior disponibilidade, impõe uma restrição mais realista ao período crítico, sem aumentar o risco de escassez hídrica ou causar danos ambientais.

**Palavras-chave:** Área potencial irrigável, Vazão mínima de referência, Ottobacias, Savana, Gestão de recursos hídricos

## 1. Introdução

A produção mundial de alimentos precisará aumentar em aproximadamente 60% para atender o aumento da demanda projetada para o ano de 2050 (UNESCO, 2021). Neste contexto, o Brasil terá um papel cada vez mais importante, uma vez que se destaca como produtor e exportador de diversas commodities agrícolas, sendo um dos principais exportadores agrícolas globais (ALLEN; VALDES, 2016; FAPDA, 2014; MEADE et al., 2016) tendo movimentado US\$ 102,14 bilhões entre 2018 e 2019 (BRASIL, 2019).

Grande parte da produção brasileira de alimentos vem da Savana brasileira (região do Cerrado), que é o segundo maior bioma em extensão, sendo considerado um hotspot mundial

de biodiversidade com mais de 11 mil espécies nativas (STRASSBURG et al., 2017). Dos seus 204 milhões de hectares, 70% possuem potencial para o desenvolvimento da agricultura (FRANCISCO; KAPPES, 2012). O Cerrado é a principal fronteira agrícola do Brasil, respondendo por quase 45% de toda a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas no país (IBGE, 2018a).

Na região do Cerrado, a intensificação da agricultura é considerada uma importante estratégia para reduzir os desequilíbrios dos ecossistemas. Uma vez que com o aumento da produtividade agrícola em uma mesma área, evita a necessidade de abertura de novas áreas para atender à crescente demanda por alimentos. Nesse contexto, a agricultura irrigada, principal usuária dos recursos hídricos no Brasil, se apresenta como uma das tecnologias mais promissoras. Contudo, seu maior desafio é conciliar sua expansão com a disponibilidade de recursos hídricos, principalmente em áreas que já apresentam escassez de água (RODRIGUES, 2017).

Um dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos no Brasil é a outorga de uso da água, conforme a Lei Federal Nº 9.433 de 1997 (BRASIL, 1997). A outorga de direito de uso de recursos hídricos é um instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que tem como objetivo assegurar o controle tanto qualitativo como quantitativo dos usos de água, garantindo ao usuário acesso a esse recurso, uma vez que regulariza o seu uso em uma bacia hidrográfica (ANA, 2011).

A outorga de concessão de uso da água é uma importante ferramenta para gerenciar os cursos hídricos, sendo esta estabelecida a partir de um conjunto de métodos e procedimentos que propõem auxiliar as definições que são necessárias para o balanço entre oferta e demanda de água (COLLARES et al. 2022; LEMOS; MAGALHÃES JÚNIOR 2015). As outorgas para a captação de águas superficiais a fio d'água em rios, córregos e ribeirões, onde a retirada ocorre diretamente do curso d'água, são baseadas na análise da disponibilidade hídrica. Sendo esta avaliada em função da adoção das vazões de referência ocorridas naturalmente nos mananciais ou a partir de intervenções hidráulicas como barragens (ANA, 2011).

No Brasil, o critério de outorga ou vazão máxima outorgável é fundamentado em vazões mínimas de referência e na determinação de limites percentuais para uso dessas vazões que caracterizam uma condição de garantia de água no curso hídrico. A determinação das vazões de referência é estabelecida a partir de análises dos períodos mais críticos de estiagem (FINKLER et al., 2015). As vazões mínimas de referência são as vazões de elevada permanência no tempo, sendo as mais utilizadas a Q95 e Q90 (vazões com 95 a 90% de permanência no tempo), que é obtido através da curva de permanência; e a Q7,10 que é a menor

vazão média consecutiva de sete dias associada a um período de retorno de 10 anos (ANA, 2011; GOMES; FERNANDES, 2017; OLIVEIRA et al., 2017; RAMOS et al., 2021; REILLY; KROLL, 2003).

No Brasil, a Constituição Federal dividiu o domínio das águas entre a União, Estados e o Distrito Federal (DF). Cabe aos Estados e ao DF o domínio das águas subterrâneas, dos rios estaduais e dos distritais. Uma dificuldade que surge frente ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é a utilização de diferentes critérios de outorga pelos Estados e a União (GOMES; FERNANDES, 2017). Pois essa diferença de critérios adotados de vazões mínimas de referência e os diferentes percentuais destas vazões para outorga, em alguns casos limitam o uso da água. Esse fato pode afetar os diversos usos, como a irrigação, abastecimento urbano, geração de energia elétrica, produção industrial, entre outros (SILVA et al., 2015; SIQUEIRA et al. 2021).

Diante das mudanças nos padrões de consumo, das variações climáticas e em outras questões específicas de cada país, nas últimas décadas muitos países revisaram suas leis e políticas de gestão dos recursos hídricos, aprimorando os instrumentos de planejamento de gestão (VEIGA; MAGRINI, 2013). O processo de outorga existe há mais de 20 anos no Brasil e os instrumentos de gestão precisam ser aprimorados. As vazões mínimas de referência anuais adotadas como critério para as outorgas, frequentemente, são concedidas vazões que não representam as abstrações reais, podendo ser restritiva nos meses de maior disponibilidade ou explorados além do valor concedido nos períodos de estiagem. Sendo a combinação desses fatores um impedimento a gestão eficaz em bacias hidrográficas, especialmente em áreas de conflito pelo uso da água (RAMOS et al., 2021). A combinação desses fatores dificulta a gestão efetiva das bacias hidrográficas, especialmente em áreas com conflito de uso da água (COSTA E SILVA et al. 2020; FERRARINI et al. 2020).

Para fins de planejamento, é crucial entender como esses diferentes critérios de vazões mínimas de referência influenciam na disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica (SMAKHTIN, 2001), e nas estratégias de expansão das atividades econômicas, como, por exemplo, da agricultura irrigada. Outras modalidades de outorga, como a outorga sazonal, têm sido apontadas como solução para regiões em situações de conflito, sendo importante avaliar essa modalidade de outorga nas diferentes regiões, uma vez que as vazões variam regionalmente e sazonalmente (HANNAFORD; BUYS, 2012). Além da outorga, uma alternativa relevante é a alocação negociada da água. Essa abordagem envolve a criação de acordos entre os diversos usuários, possibilitando a conciliação dos diferentes interesses e a construção coletiva de soluções para a gestão dos recursos hídricos.

Compreender o potencial hídrico é fundamental para o planejamento estratégico de desenvolvimento econômico de uma região (RÁPALO et al. 2021). Diante desse contexto, os objetivos deste estudo foi avaliar o impacto da aplicação de diferentes critérios de outorga anuais e sazonais adotados no Brasil na disponibilidade hídrica potencial de bacias hidrográficas do Cerrado, e estimar a área potencial irrigável considerando cada um dos critérios de outorga avaliados.

## 2. Material e Métodos

### 2.1. Área de estudo

O estudo compreende o Bioma Cerrado (Figura 1). Esse bioma engloba o Distrito Federal, o estado de Goiás e parte dos estados de Minas Gerais, Tocantins, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia, Paraná e São Paulo (BOLFÉ et al., 2020; KLINK; MACHADO, 2005).

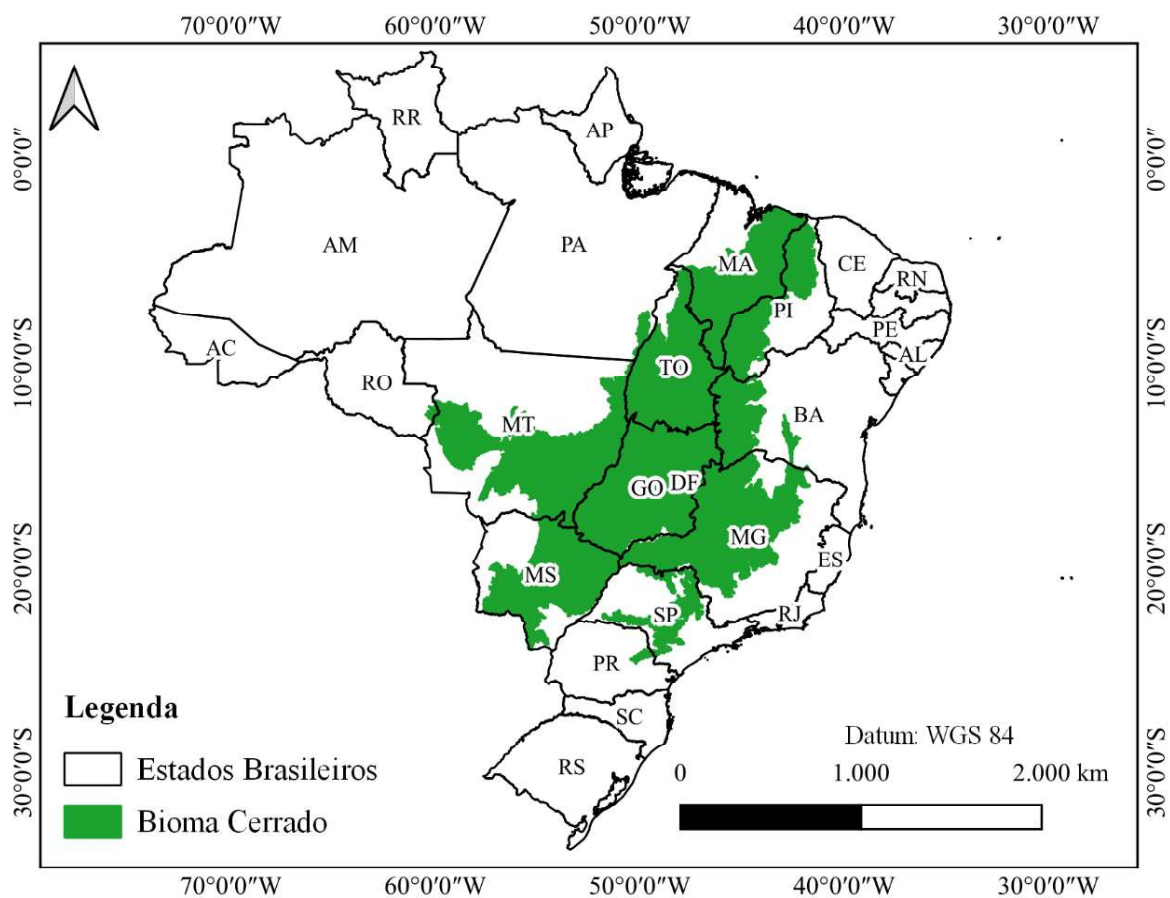


Figura 1 – Bioma Cerrado no Brasil.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o bioma Cerrado é classificado predominantemente como clima tropical de savana (Aw) (ALVARES et al., 2013). Esse clima Aw é caracterizado como um clima tropical de savana com invernos secos e possuir duas estações bem definidas. A temperatura média do ar é superior a 18 °C em todos os meses do ano. A precipitação do mês mais seco é inferior a 60 mm, sendo a estação seca predominantemente de maio a setembro, e a estação chuvosa de outubro a abril, sendo responsável por aproximadamente 90% da precipitação total anual (KLINK, 2014; RODRIGUES et al., 2012). Sano et al. (2019) verificaram que a precipitação anual do Cerrado varia de 600 a 2.000 mm, aumentando de Leste a Oeste, com média anual de 1.431 mm.

Da área total do Cerrado, de aproximadamente 204 milhões de hectares (24% do território nacional), cerca de 53,6% estão cobertas por vegetação nativa (109,4 Mha); 31,2% por pastagem plantada (63,6 Mha); 11,8% por agricultura anual e perene (24,1 Mha); 1,9% de floresta plantada (3,8 Mha); e 1,5 % por áreas urbanas e outros (3,1 Mha) (MAPBIOMAS, 2020).

## **2.2. Divisão da área de estudo**

Para o desenvolvimento desse estudo foi adotado como referência a base hidrográfica otocodificada. De acordo com o Conselho Nacional de Recurso Hídricos (CNRH) em 2002, estabeleceu por meio da Resolução nº30/2002, que o método de Otto Pfasterter é a codificação oficial das bacias hidrográficas no Brasil. Esse método consiste na subdivisão e codificação de bacias hidrográficas, com o uso de dez algarismos, relacionados a área de drenagem dos cursos hídricos. Sendo os números pares (2, 4, 6 e 8) atribuídos em ordem da jusante para montante aos quatro maiores tributários do rio principal, em seguida os demais tributários do rio principal (1, 3, 5, 7 e 9) são agrupados em ordem nas áreas restantes. De posse da codificação continental das bacias hidrográficas, apresentando 10 regiões (nível 1), uma nova subdivisão é realizada em cada uma dessas áreas para se obter o próximo nível (ANA, 2014).

Sendo assim, para fins de análise, foram utilizadas as Ottobacias de nível 5, totalizando 4.531 ottobacias (Figura 2) com tamanho médio de 569 km<sup>2</sup> e mediana de 185 km<sup>2</sup> (ALTHOFF et al., 2022).

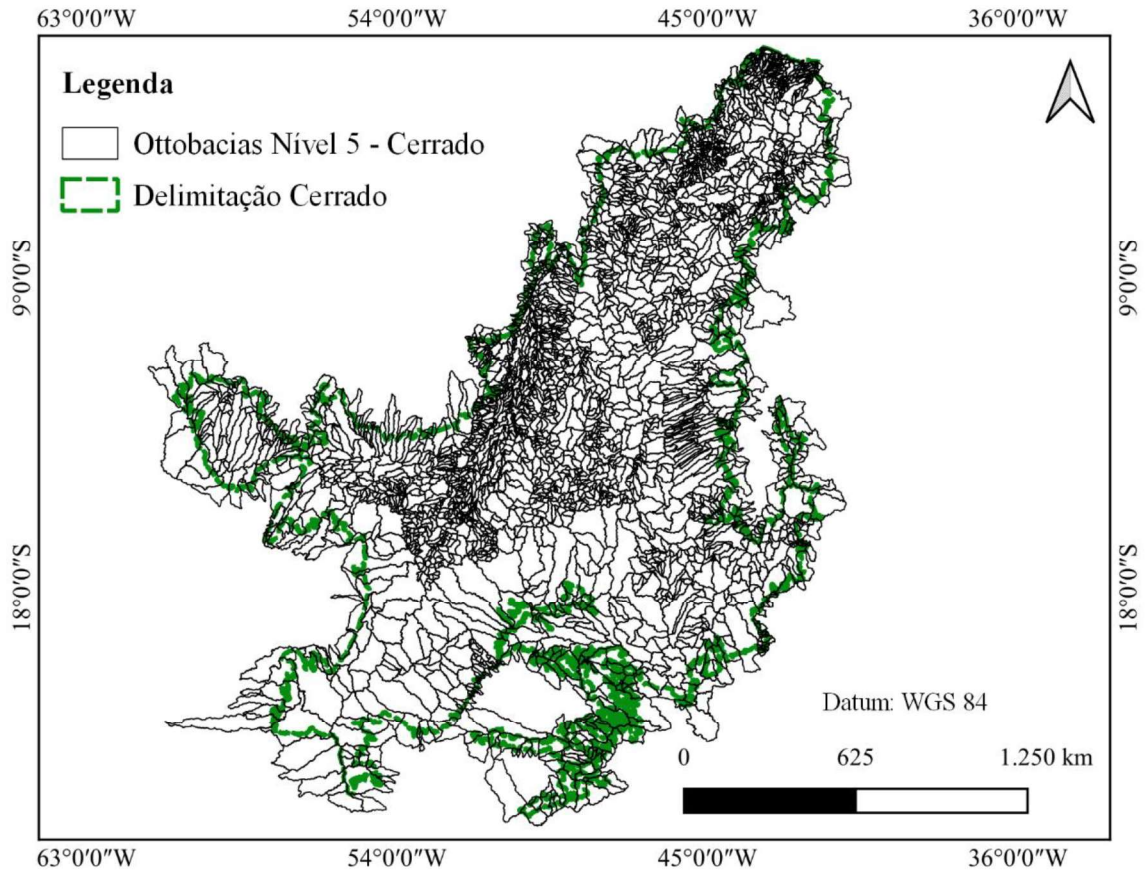


Figura 2 – Ottobacias nível 5 no Bioma Cerrado.

### 2.3. Dados fluviométricos

As vazões diárias do Cerrado foram obtidas do banco de dados HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022). Essa base de dados apresenta a disponibilidade hídrica para as 4.531 Ottobacias de nível 5 do Cerrado. As séries de vazões diárias foram obtidas por meio da parametrização e regionalização de parâmetros do modelo hidrológico conceitual GR5J (LE MOINE, 2008), em que o desempenho foi melhor nas regiões Central, Sudoeste e Sudeste do bioma (ALTHOFF et al., 2022). As séries regionalizadas cobrem o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2019 e estão disponíveis em: <https://github.com/daniel-althoff/HydroCerrado/>.

### 2.4. Avaliação da disponibilidade hídrica potencial sob diferentes critérios de outorga nas Ottobacias do Cerrado

Para avaliar o impacto da aplicação de diferentes critérios de outorga, a disponibilidade hídrica, em cada uma das 4.531 ottobacias hídrica do Cerrado, foi avaliada considerando a aplicação dos diferentes critérios de outorga adotados pelos Estados, Distrito Federal e União. Na Tabela 1 apresenta-se a vazão mínima de referência anual e o percentual permitido para uso, de acordo com a cada órgão outorgante.

Tabela 1 - Critérios de outorga de direito de uso de recursos hídricos adotados para captação de águas superficiais nos estados pertencente ao bioma Cerrado

<b>Local</b>	<b>Órgão gestor</b>	<b>Vazão máxima outorgável</b>
Distrito Federal	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal - Adasa	80% da Q7,10; Q90; Q95 e Q <sub>mmm</sub> *
Goiás	Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos - Secima	50% da Q95
Minas Gerais	Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM	30% e 50% da Q7,10
Tocantins	Instituto Natureza do Tocantins - NATURATINS	75% da Q90
Mato Grosso	Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SEMA	70% da Q95
Mato Grosso do Sul	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul - IMASUL	70% da Q95
Maranhão	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais - SEMA	80% da Q90
Bahia	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA	80% da Q90
Piauí	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí - SEMAR	80% da Q95
São Paulo	Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE	50% da Q7,10
Paraná	Instituto Água e Terra - IAT	50% da Q95
Brasil	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA	70% da Q95

\*Q<sub>mmm</sub> - média das mínimas mensais.

De acordo com Castro et al. (2016), o órgão gestor adota o critério de referência e percentual permitido, estabelecendo assim através da outorga qual a quantidade de água que pode ser disponibilizada e utilizada de um curso d'água para os diversos usos e a vazão que deve ser mantida para a integridade das comunidades aquáticas, considerada vazão remanescente.

O critério de referência Q7,10 é adotado em Minas Gerais com percentual de concessão de 30 e 50%; São Paulo com percentual concedível de 50%; e o Distrito Federal com percentual concedível de 80%. O Distrito Federal e Minas Gerais possuem mais de um critério de vazão máxima concedível (Tabela 1). Para os usos de águas superficiais em rios do Distrito Federal, são estabelecidos os seguintes limites máximos para a soma das vazões a serem outorgadas em

uma mesma vazão: são até 80% (oitenta por cento) das vazões de referência Q7,10, Q90, Q95 ou Qmmm (média dos mínimos mensais), quando não houver ônus (SINJ-DF, 2017).

O limite máximo de captações em recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais, para cada seção considerada em condições naturais, será de 50% (cinquenta por cento) da Q7,10. E que o limite máximo de captações em recursos hídricos nas Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRHs – Rio Pará, Rio Paraopeba, Rio das Velhas, Rios Jequitai e Pacuí, Rio Urucuia, Rio Pandeiros e Rio Verde Grande, para cada seção considerada em condições naturais, será de 30% (trinta por cento) da Q7,10 (IGAM, 2019).

Para avaliar a diferença relativa da disponibilidade hídrica das ottobacias considerando a adoção das vazões mínimas de referência nas bases mensal e anual, utilizou-se a Equação 1, seguindo se a metodologia adotada por Silva et al. (2015) e Serrano et al. (2020).

$$D_p = \frac{Q_{\text{mensal}} - Q_{\text{anual}}}{Q_{\text{anual}}} \times 100 \quad 1$$

em que

$D_p$  = diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica, %;

$Q_{\text{mensal}}$  = vazão estimada em base mensal,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , e

$Q_{\text{anual}}$  = vazão estimada em base anual,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Para avaliar a diferença relativa da disponibilidade hídrica considerando os critérios de vazão mínima para as outorgas, utilizou-se a Equação 2, seguindo a metodologia adotada por Silva et al. (2015) e Serrano et al. (2020). Essa diferença relativa foi calcula adotando-se como base a Q95, que é a vazão de referência adotada nos cursos d'água de domínio da união e de alguns estados.

$$D_p = \frac{Q_{7,10 \text{ ou } 90} - Q_{95}}{Q_{95}} \times 100 \quad 2$$

em que

$Q_{7,10 \text{ ou } 90}$  = menor vazão média consecutiva de sete dias que ocorreria em um período de retorno uma vez a cada 10 anos ou vazão com 90% de permanência no tempo,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ , e

$Q_{95}$  = vazão com 95% de permanência no tempo,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Para estimativa das vazões mínimas de referência anuais e mensais das ottobacias a partir de dados históricos de vazão, de janeiro de 2003 a dezembro de 2019, os cálculos associados a essas estimativas foram desenvolvidos em ambiente R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021), por meio do pacote “hidrowebr” que é uma ferramenta para análise estatística de séries hidrológicas, as funções são divididas em pré-processamento, processamento e análise, e estão disponíveis no repositório do GitHub: <https://github.com/renatoinomata/hidrowebr>.

Para avaliar o impacto da disponibilidade hídrica potencial em função dos diferentes critérios estabelecidos pelos Estados e União no Cerrado anualmente, foram estimadas as vazões mínimas de referência considerando a área de todas as ottobacias para os meses de maior e menor disponibilidade hídrica. Essa análise permite entender como esses diferentes critérios impactam a disponibilidade hídrica potencial e, conseqüentemente, o valor da vazão outorgada.

### **2.5. Avaliação do potencial de aumento da área irrigada considerando diferentes critérios de outorga**

A Equação 3 foi utilizada para estimar o potencial de aumento da área de irrigação em função da quantidade de água disponível.

$$A_i = \frac{Q_o}{Q_i} \quad 3$$

em que:

$A_i$  = área irrigável, ha;

$Q_o$  = vazão máxima disponível para ser outorgada em base anual,  $m^3s^{-1}$ ; e

$Q_i$  = vazão requerida pela irrigação,  $m^3s^{-1}ha^{-1}$ .

Para determinar o potencial de desenvolvimento da agricultura irrigada no bioma Cerrado, foi calculada a quantidade de área em hectares que poderia ser irrigada adicionalmente considerando o uso de água de irrigação por aspersão convencional por hectare igual a 1,4 L/s (0,0014  $m^3/s$ ). Assumiu-se que a disponibilidade hídrica para a outorga era destinada apenas para irrigação.

### **3. Resultados e Discussão**

A Q7,10, de maneira geral, é o critério mais restritivo (Figura 3). Nas regiões que adotam esse critério, tem-se uma menor disponibilidade hídrica potencial para ser outorgada, indicando que a área para aumento da irrigação é menor quando comparada com os demais critérios.

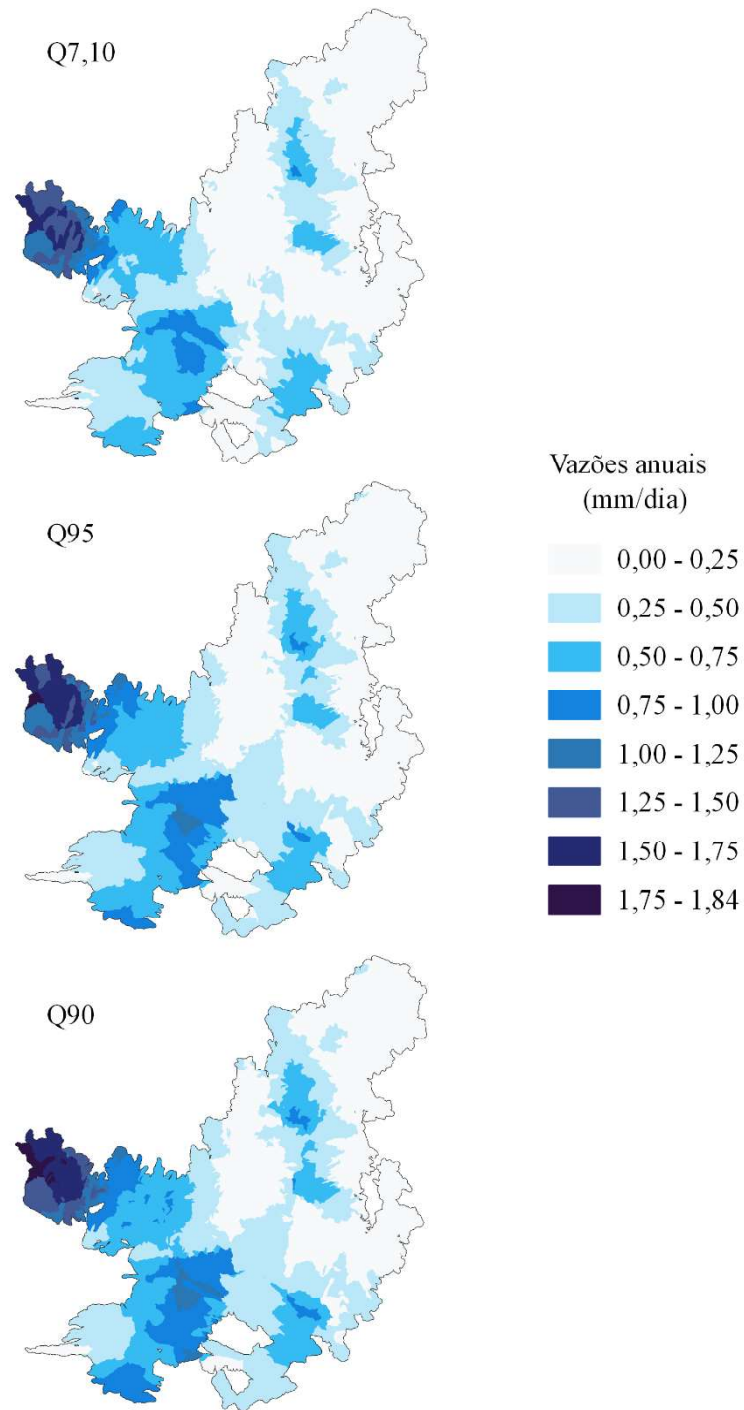


Figura 3 - Vazões mínimas anuais de referência (Q7,10; Q95 e Q90) no bioma Cerrado, para o período de 2003 a 2019.

Na Figura 4 apresenta-se o boxplot das vazões mínimas de referência anuais, Q7,10; Q95 e Q90, para as ottobacias do Cerrado. As vazões foram normalizadas por área para analisar seu comportamento em ottobacias de diferentes tamanhos.

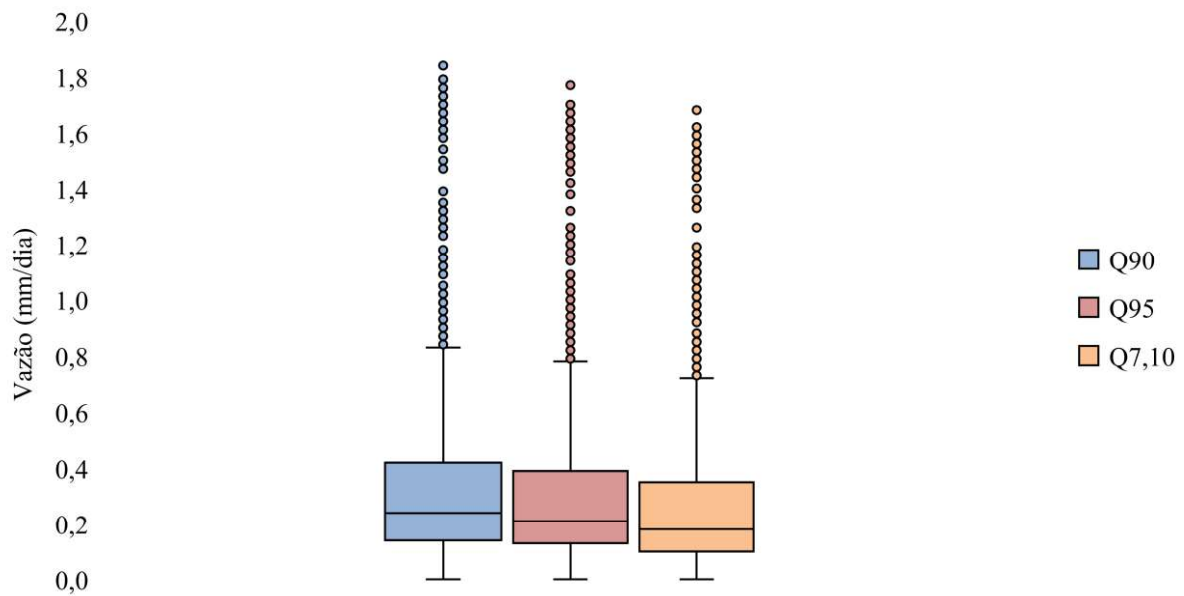


Figura 4 - Vazões mínimas de referência anuais, Q7,10; Q95 e Q90, para as ottobacias do Cerrado.

Dentre as vazões mínimas de referência Q7,10; Q95 e Q90, observa-se na Figura 4 que elas apresentam comportamento parecidos, embora existam diferenças entre a variabilidade dos dados. A maior dispersão dos dados ocorre na Q90, seguido pela Q95 e Q7,10. No entanto todas elas apresentam dados assimétricos positivos, sendo a mediana maior para Q90 com valor de 0,24 mm/dia; seguido pela Q95 com 0,21 mm/dia; e a Q7,10 com 0,18 mm/dia. Todas as vazões mínimas de referência possuem dados discrepantes, em regiões onde a disponibilidade hídrica potencial é mais elevada.

Em média no Cerrado (Figura 3), a Q90 é 8% maior que a Q95 e 22% maior que Q7,10. Por exemplo, a ottobacia 76869, localizada no município de Paracatu, pertencente à Bacia hidrográfica do Rio Paracatu, um dos principais afluentes do Rio São Francisco, possui uma disponibilidade hídrica potencial para ser outorgada pela Q7,10 de 0,9 m<sup>3</sup>/s, ou seja, 77.760 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>. Se, nessa mesma ottobacia, fosse adotado a Q90 ter-se-ia um potencial cerca de 36.860 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup> de água adicional para ser outorgada.

As áreas de maior disponibilidade hídrica potencial, independente da vazão mínima de referência (Q7,10; Q95 e Q90), estão localizadas nas regiões Oeste e Sul do Cerrado (Figura 3), onde se situa, por exemplo, o município de Campos de Júlio no Mato Grosso e em Paranhos no Mato Grosso do Sul, respectivamente. Enquanto as menores disponibilidade estão no Leste, município de Igaporã na Bahia e ao Norte, município de Matões do Norte no Maranhão.

Essa diferença na disponibilidade hídrica potencial pode ser explicada pela variabilidade espacial da precipitação, que apresenta uma variação de 600 a 2.000 mm, aumentando de Leste para a Oeste (SANO et al., 2019). De acordo com Althoff et al. (2021b), no Oeste ocorre a transição do Cerrado com o bioma Amazônia, sendo o clima tropical com maiores taxas de precipitação, assim como no Sul a região é de clima temperado tendo bons índices de precipitação. Já ao Norte e no Leste o fato da menor disponibilidade hídrica, se deve à transição para o Semiárido.

Em base mensal, conforme esperado, em função do comportamento geral das vazões mínimas de referência consideradas, as regiões que utilizam a Q7,10 mensal como referência também possui uma menor disponibilidade hídrica potencial para ser outorgada em suas ottobacias em comparação as outras vazões de referência mensais para o mesmo período. Por exemplo, na ottobacias 69667, com área de 14.433 ha, localizada no município de Caiapônia em Goiás, no mês de janeiro, a disponibilidade hídrica potencial para Q7,10 mensal é igual a 1,44 m<sup>3</sup>/s, enquanto a Q95 é igual a 1,54 m<sup>3</sup>/s e a da Q90 igual a 1,72 m<sup>3</sup>/s. Além disso, especialmente as maiores disponibilidade hídrica potencial para serem outorgadas, independente da vazão de referência também se concentram ao Oeste e Sul da região do Cerrado, enquanto as menores disponibilidade estão no Leste e ao Norte.

Assim como Bowers et al. (2012) em seu estudo de fluxos sazonais, grandes diferenças foram encontradas entre as estações chuvosa e seca. Constatou-se neste estudo que a maior disponibilidade hídrica potencial mensalmente ocorre nos meses do período chuvoso, sendo fevereiro e março os meses com maior potencial hídrico. Os meses de menor disponibilidade hídrica potencial foram observados em setembro e outubro. Embora, em geral, outubro seja o mês do início da estação chuvosa no Cerrado (KLINK, 2014; RODRIGUES et al., 2012), nesse mês ainda não há alteração na vazão. Isso se deve às chuvas ocorridas naquele mês, antes de contribuir para o aumento das vazões, elas vão, antes de tudo, suprir o déficit hídrico do solo (ASSANI et al., 2011; CAMBRAIA NETO; RODRIGUES, 2021).

### **3.1. Comparação da disponibilidade hídrica potencial nas ottobacias da região do Cerrado em função da vazão de referência**

Na Figura 5 apresenta-se a diferença relativa percentual entre a disponibilidade hídrica potencial obtida nas ottobacias da região do Cerrado considerando como referência a Q95 anual em relação a Q7,10 e a Q90 anuais.

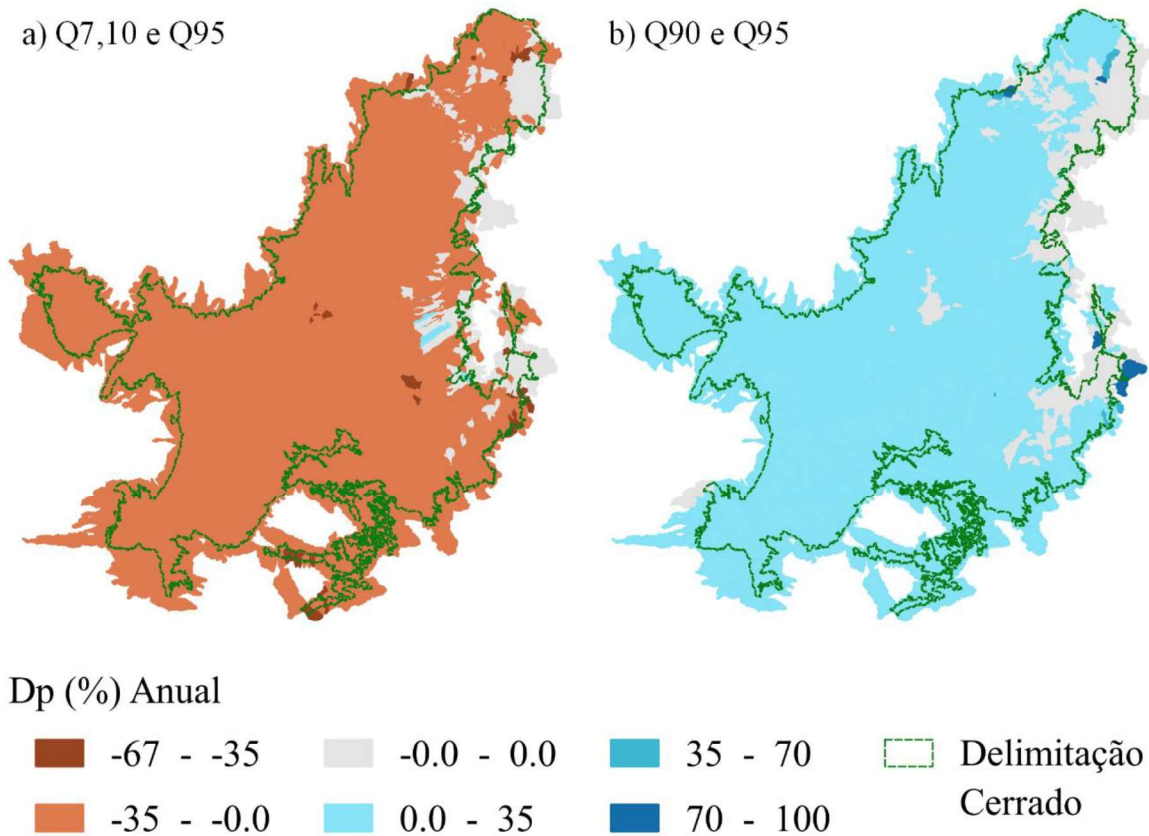


Figura 5 - Diferença relativa percentual (Dp) entre a disponibilidade hídrica potencial obtida na região do Cerrado considerando todas as ottobacias e utilizando como referência a Q95 anual em relação a Q7,10 (a) e a Q90 (b) anuais.

A diferença relativa dos critérios anuais da Q7,10 com a Q95, é negativo em 92,2% das ottobacias, como pode ser observado na Figura 5a, isso significa que o valor da vazão disponível para ser outorgada correspondente ao critério da Q7,10 é inferior a Q95. Em 91% das ottobacias avaliadas, ou seja, em 4.127 ottobacias, observou-se uma diferença percentual de até 35%, e em 1,2% da área, essa diferença foi maior que 35%, chegando a até 66,7%. Em 7,5% das ottobacias nas regiões localizadas ao Leste e ao Norte do Cerrado, não se observou diferença entre os critérios. Em apenas 0,22% das ottobacias, ou seja, em 10 ottobacias, a disponibilidade hídrica avaliada pelo critério da Q7,10 foi superior a Q95, chegando em alguns casos a ser 14,3% maior. A Q7,10 foi maior devido a menor vazão média de sete dias consecutivos ser superior a vazão de permanência em 95% do tempo, nessas ottobacias.

A diferença relativa dos critérios anuais da Q90 com a Q95, é positivo em 85,5% das ottobacias, como pode ser observado na Figura 5b, isso significa que a vazão disponível para ser outorgada correspondente ao critério da Q90 é superior a Q95, como já era esperado, tendo em 3.849 ottobacias, 84,9% da área, uma diferença da disponibilidade hídrica maior em até

35%, e em 0,6% da área, 27 ottobacias, uma diferença da disponibilidade hídrica superior a 35%, chegando em até 100%, já em algumas ottobacias ao Leste e ao Norte; 14,5% da área, 655 ottobacias, não foi observado diferença entre os critérios.

Na Figura 6 apresenta-se a diferença relativa percentual entre a disponibilidade hídrica potencial obtida na região do Cerrado considerando todas as ottobacias e utilizando como referência a Q95 mensal em relação a Q7,10 mensal. Quando comparado o critério mensal a diferença relativa da disponibilidade hídrica dos critérios Q7,10 com a Q95, variou entre o período chuvoso e o período de estiagem.

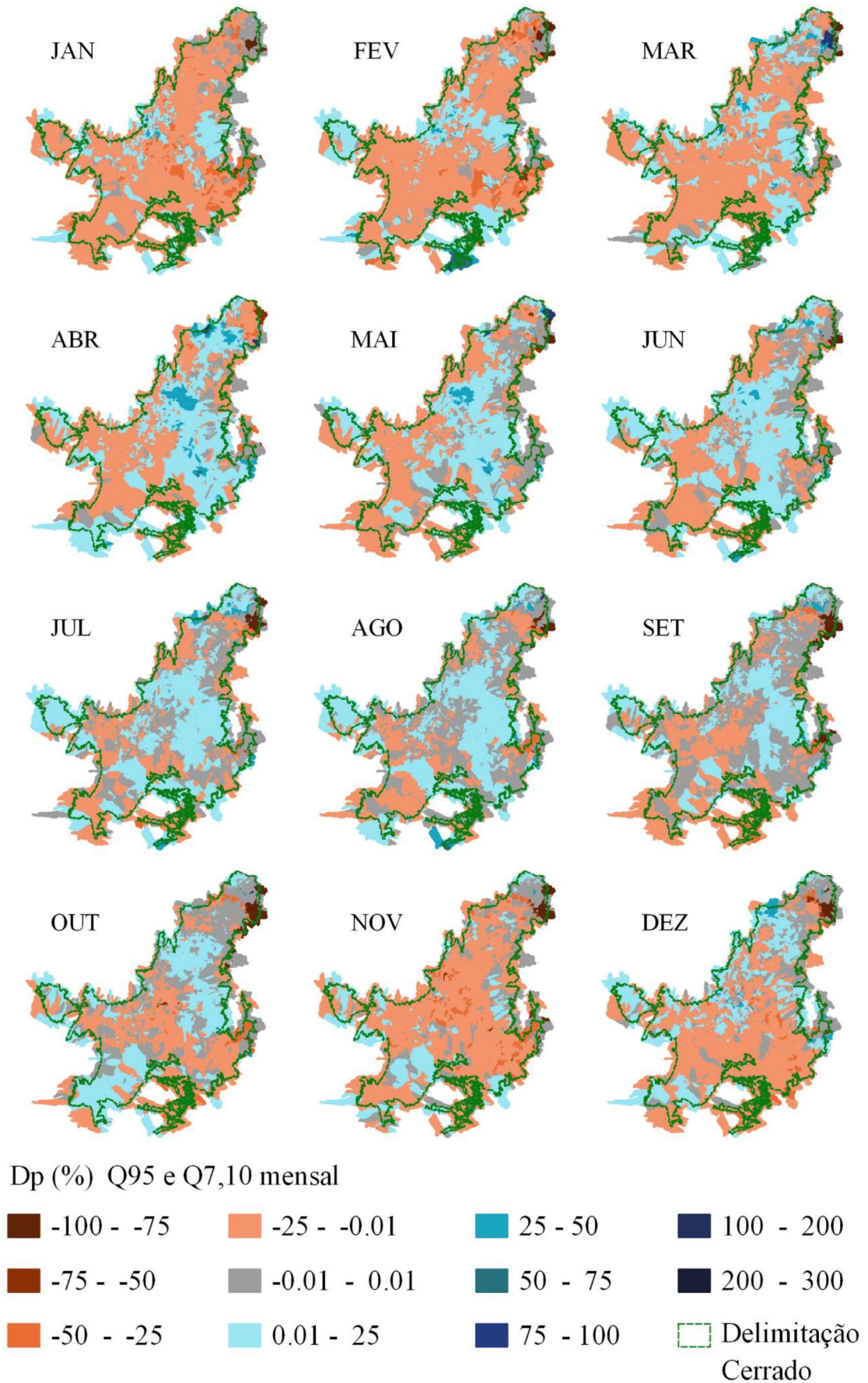


Figura 6 - Diferença relativa percentual mensal (Dp) entre Q7,10 e Q95 para a região do Cerrado.

No período chuvoso (novembro a março), em ~ 59,4% da área (2.693 ottobacias), a Q7,10 foi menor que a Q95 em até 25%; e em ~1,3% da área (58 ottobacias) essa diferença foi superior de 25% até 100%. Em ~17% da área (774 ottobacias), não há diferenças entre os critérios. E em ~21,9% da área (990 ottobacias), a disponibilidade hídrica potencial da Q7,10 é superior a Q95 em até 25%, e em 0,4% da área (16 ottobacias) essa diferença é superior de 25% até 100%. Já para o período de estiagem (abril a outubro), as ottobacias possuem em ~ 34,3% da área (1.554 ottobacias) onde a diferença da disponibilidade hídrica potencial da Q7,10 é maior em até 25% em comparação com a Q95, e em ~ 0,70% (33 ottobacias) essa superioridade varia de 25% até 100%. Em ~ 28,7% da área (1.302 ottobacias) não se observou diferença entre os critérios. E em ~ 35,9% da área (1.626 ottobacias), a Q7,10 é inferior em até 25% da Q95, e em ~ 0,40% (16 ottobacias), essa inferioridade varia de 25% a 100%.

Assim como resultados aqui encontrado, em estudo realizado por Arai et al. (2020) na bacia do Ivinhema, localizada no Mato Grosso do Sul, as estações fluviométricas apresentaram variações quanto a Q7,10 em relação a Q95, tendo meses em que a Q7,10 foi superior a Q95.

Na Figura 7 apresenta-se a diferença relativa percentual entre a disponibilidade hídrica potencial obtida nas ottobacias da região do Cerrado considerando como referência a Q95 mensal em relação a Q90 mensal. Como pode se observar, em todos os meses a diferença relativa da disponibilidade hídrica entre os critérios da Q90 com a Q95 foi positivo ou igual a zero nas ottobacias, como já era esperado.

No período chuvoso (novembro a março), a Q90 foi superior em cerca de 78,1% da área (3.539 ottobacias) com disponibilidade hídrica potencial maior em até 25%, e em média 9,9% da área (456 ottobacias), essa diferença foi maior entre 25 e 50% em relação a Q95. Em apenas 0,6% da área (26 ottobacias) a diferença foi maior do que 50% chegando até 200% de diferença, enquanto em 11,0% da área (510 ottobacias) não foi observado diferença entre os critérios. Já no período de estiagem (abril a outubro), a Q90 teve em 72,7% da área (3.294 ottobacias) uma diferença da disponibilidade hídrica potencial superior em até 25%, e em ~ 8,4% da área (382 ottobacias), entre 25 e 50% em relação a Q95. Em ~ 0,6% da área (27 ottobacias), essa diferença foi superior a 50% chegando em até 300% a diferença. E ~18,3% da área (828 ottobacias) a vazão desses critérios foram idênticas.

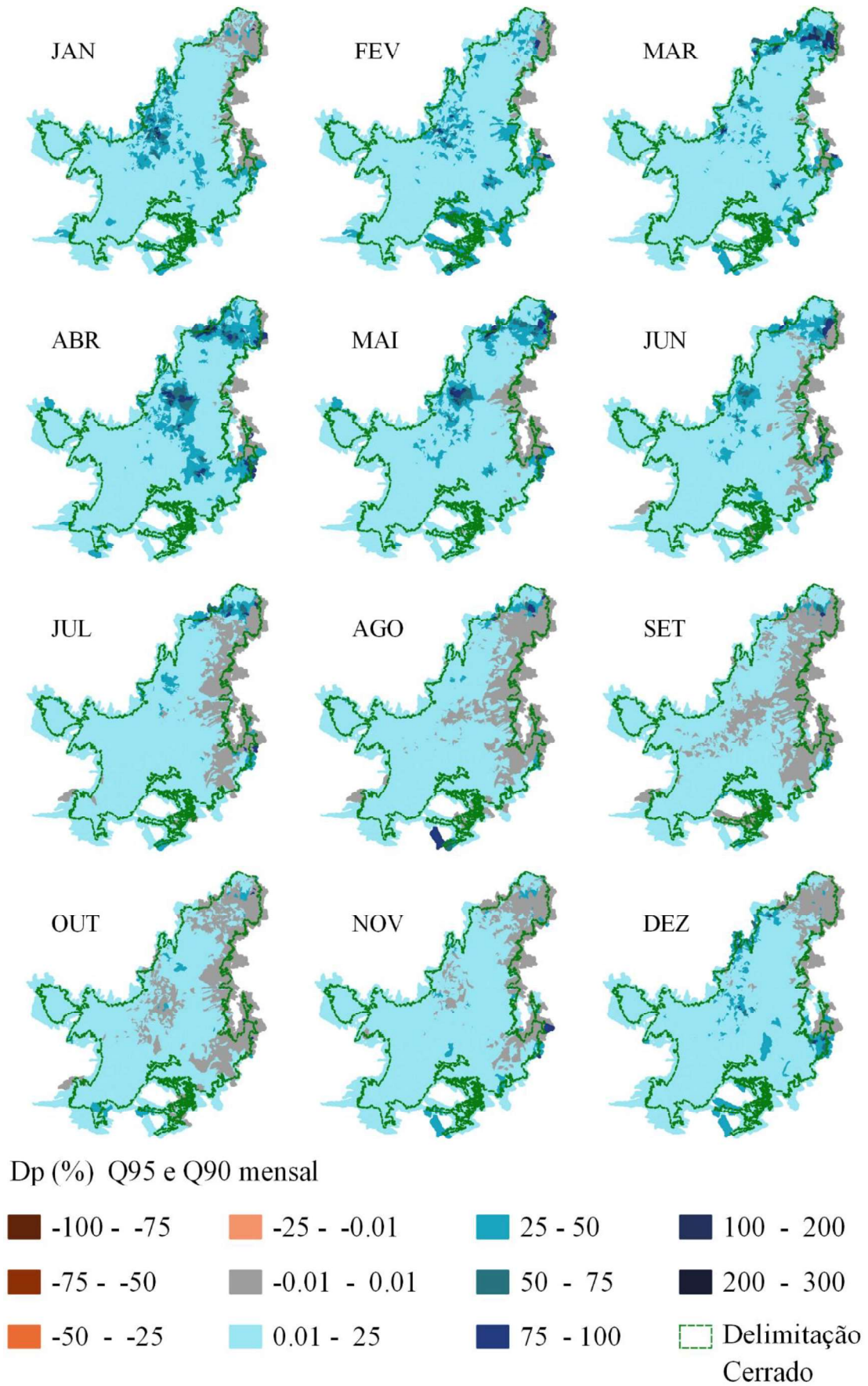


Figura 7 - Diferença relativa percentual mensal (Dp) entre Q90 e Q95 para a região do Cerrado.

Com base nas Figuras 6 e 7, que mostram a diferença percentual relativa entre a disponibilidade hídrica potencial obtida na região do Cerrado, considerando todas as otobacias e tomando como referência o Q95 mensal em relação ao Q7.10 mensal e o Q90 mensal, respectivamente, é possível verificar que, em geral, há uma variação significativa entre as vazões de referência adotadas, principalmente entre os períodos mais úmidos e os mais secos. Nos meses que compreendem o período chuvoso, a vazão de referência Q90 poderia ser adotada nas otobacias do Cerrado, pois existe esse potencial, tanto em relação a Q7,10 quanto a Q95, principalmente nas áreas ao Oeste, área de transição com o Amazonas e Pantanal.

A diferença relativa percentual entre as disponibilidades hídricas mensais e anuais considerando os valores de Q7,10, Q95 e Q90 para os meses de março (maior disponibilidade) e outubro (menor disponibilidade) estão representadas na Figura 8.

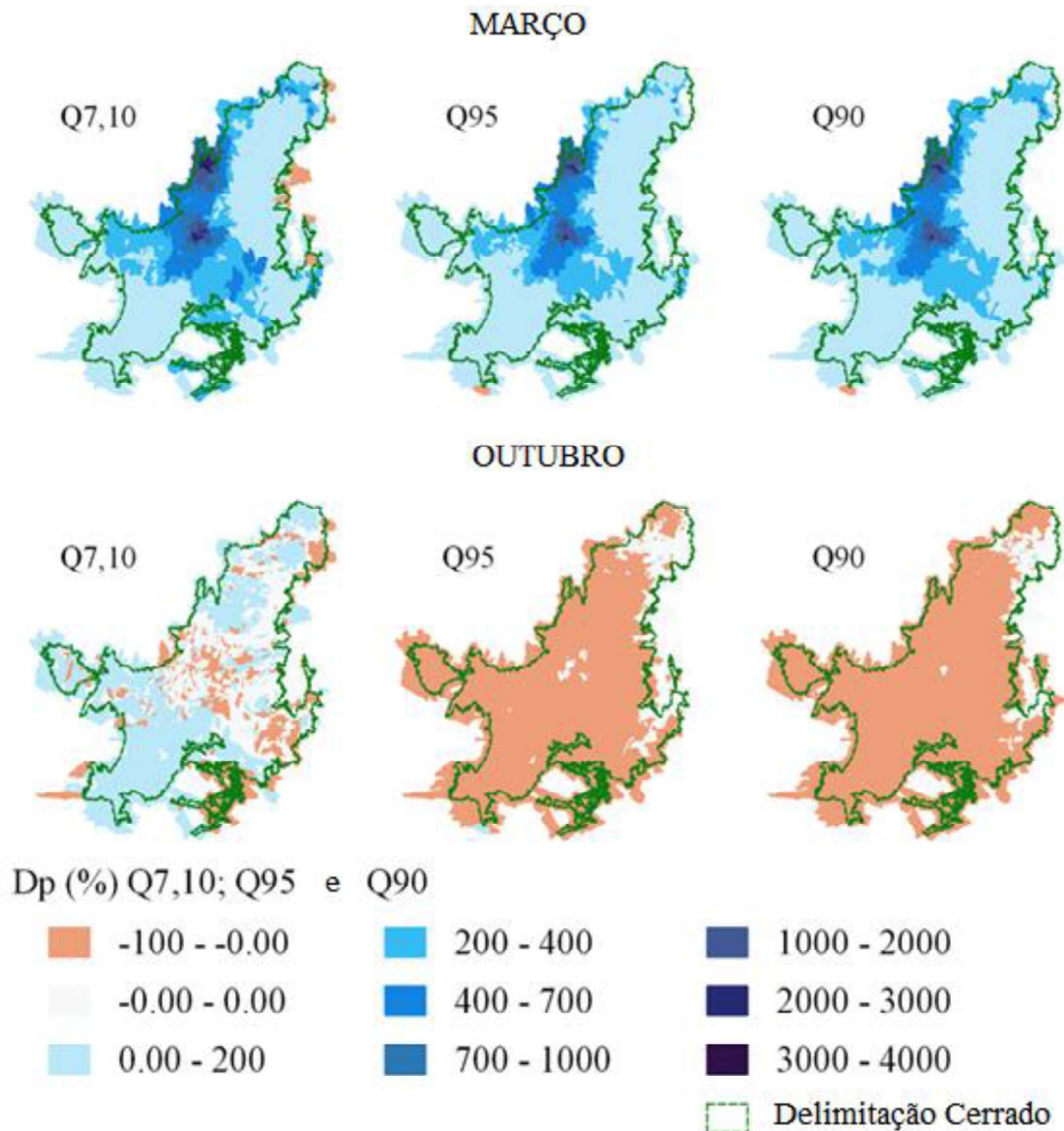


Figura 8 - Diferença relativa percentual ( $D_p$ ) entre a disponibilidade hídrica potencial das vazões mensais em relação à vazão anual de Q7,10; Q95 e Q90 nos meses de março e outubro.

Considerando que fosse adotado nas ottobacias do Cerrado um critério único para cada uma das vazões mínimas de referência (Q7,10; Q95 ou Q90), verifica-se que, de maneira geral, há aumento da disponibilidade hídrica potencial utilizando a vazão de referência na base mensal. Comparando os dados das vazões mínimas de referência anuais com as mensais, nota-se que nos meses que compreende a estação chuvosa, a diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica potencial é positiva na maior parte da área, ou seja, a disponibilidade hídrica potencial anual é menor do que a disponibilidade hídrica potencial mensal, principalmente, ao Oeste, Sul e na porção Central da região do Cerrado, tanto para Q7,10; Q95 e Q90.

Por exemplo, no mês de março, considerando a Q7,10 como referência (Figura 8), observa-se que em 98,61% da área do Cerrado (4.468 ottobacias), a disponibilidade hídrica potencial no período mensal foi maior, isto é, a diferença foi positiva; para a Q95 (Figura 8), o mesmo foi observado em 98,83% da área (4.478 ottobacias); e em 99,25% da área (4.497 ottobacias), para a Q90 (Figura 8). Em algumas ottobacias observou-se diferenças da disponibilidade hídrica potencial positiva em até 4.000%, ottobacias estas caracterizadas pela alta sazonalidade. Nota-se, assim, que os critérios adotados de vazões mínimas de referência anuais, no geral, são limitantes ao uso da água nos meses de maior disponibilidade hídrica potencial na região do Cerrado.

Observou-se que quando a Q7,10 foi utilizada em todo o Cerrado, houve algumas ottobacias em que a diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica potencial foi negativa (Figura 8), a vazão de referência mínima anual seria maior do que a vazão de referência mínima mensal, principalmente no período de estiagem. Analisando sob a ótica da disponibilidade hídrica, este fato demonstra que nem sempre o critério mensal contribui para aumentar a disponibilidade hídrica potencial. Tomando-se como exemplo o mês de outubro, onde 17,8% da área (806 ottobacias) apresentaram diferença da disponibilidade hídrica negativa. Nesse caso, o fato de ser mais restritivo no período de estiagem é um ponto positivo, uma vez que não serão concedidas vazão além do que realmente existe, evitando possíveis conflitos pelo uso da água. Esse fato é válido apenas para locais onde não há outorgas, e nem problemas relacionados a concessão de água. Já em locais onde há a concessão de outorgas, possivelmente a redução da vazão concedida, pode ser um fator problemático, aumentando os conflitos na região. Dessa forma, é necessário que se tenham alternativas para a gestão dos recursos hídricos nesse período.

Esse fato ocorre de maneira mais expressiva para as vazões de referência Q95 e Q90, como pode ser observado na Figura 8, onde a maioria das ottobacias do Cerrado possuem uma diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica potencial negativa, nos meses de estiagem como agosto, setembro e outubro. Por exemplo, o mês mais crítico que é outubro, 82,1% da área (3.720 ottobacias) possuem essa diferença negativa para Q95; e 86,9% da área (3.935 ottobacias) possuem essa diferença negativa para Q90.

As análises para estabelecer as vazões mínimas de referências anuais são baseadas na análise da disponibilidade hídrica dos períodos mais críticos de estiagem (FINKLER et al., 2015). É perceptível, entretanto, que é necessário entender e considerar a sazonalidade dessas vazões, além das condições regionais nas quais as bacias estão inseridas. No sentido de aumentar a disponibilidade hídrica potencial, observou que mesmo o critério mais restritivo pode ser, em algumas situações, mais interessante, no período de maior disponibilidade hídrica.

Esses resultados corroboram com os encontrados por Serrano et al. (2020), em estudo da sazonalidade das vazões mínimas de referência na bacia hidrográfica do rio Piranga, área de trânsito dos biomas Cerrado e Mata Atlântica, onde os autores constataram que o critério anual é mais permissivo nos meses de julho a novembro. A adoção desses critérios anuais implica em risco de se ter problemas nesses meses, uma vez que a vazão nesses períodos é inferior ao permitido pelo critério anual.

Além disso, estudos desenvolvidos por Bof et al. (2013) sobre o impacto de diferentes critérios de outorga na bacia do rio Paracatu, sendo está situada no bioma Cerrado, e Silva et al. (2015), na bacia do rio Paraopeba, em que a maior área se situa no Cerrado, os autores constataram que a utilização do critério de outorga anual é restritiva nos meses de maior disponibilidade hídrica e permissiva nos meses de estiagem.

### **3.2. Avaliação do impacto na disponibilidade hídrica potencial em função dos diferentes critérios estabelecidos pelos Estados e na União**

A partir das estimativas de vazões mínimas de referência, constata-se que o mês de março é o que possui as maiores disponibilidade hídrica potencial no Cerrado, atingindo, em média a diferenças da ordem de 145% maior que a disponibilidade hídrica potencial no mês de outubro, que é o mês que possui as menores vazões.

Utilizando a Q7,10 anual e os percentis de 30, 50 e 80%, limite máximo de captações em recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais, São Paulo e Brasília, respectivamente, como critério de outorga em todas as ottobacias do

Cerrado, observa-se uma disponibilidade hídrica potencial total na região equivalente a 3.286, 5.477 e 8.763 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Utilizando-se esse mesmo critério e tomando-se o mês de março como referência, nota-se que as ottobacias apresentaram uma maior disponibilidade hídrica potencial em relação a Q7,10 anual em 99,4 % das ottobacias do Cerrado, tendo um aumento médio de 142% considerando a disponibilidade hídrica potencial total. Para o mês de outubro, em 82,1% das ottobacias, a disponibilidade hídrica potencial seria igual ou maior em relação ao anual, com um aumento de apenas 2% considerando a disponibilidade hídrica de todas as ottobacias, e em 17,9% das ottobacias a vazão outorgável seria inferior a anual.

Esses resultados corroboram com estudo desenvolvido por Oliveira et al. (2013), na bacia hidrográfica do ribeirão Entre Ribeiros, situado no bioma Cerrado, e um dos principais afluentes da bacia do rio Paracatu, onde os autores constataram que o uso do critério da Q7,10 com o percentual outorgável de 30% mensal em relação ao anual, promoveu aumentos de até 209% ao longo dos meses do ano, exceto nos meses de outubro e novembro.

Utilizando a Q95 anual e os percentuais de 50, 70 e 80%, limite máximo de captações em recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado de Goiás e Paraná; Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e ANA; e Piauí e Distrito Federal, respectivamente, como critério de outorga em todas as ottobacias do Cerrado, observa-se uma disponibilidade hídrica potencial total na região equivalente a 6.144, 8.602 e 9.831 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Utilizando-se esse mesmo critério e tomando-se o mês de março como referência, nota-se que as ottobacias apresentaram uma maior disponibilidade hídrica potencial em relação a Q95 anual em 100% das ottobacias do Cerrado, tendo um aumento médio de 121% considerando a disponibilidade hídrica potencial total. Para o mês de outubro, observou-se que na maioria das ottobacias, 82,1%, a disponibilidade hídrica potencial seria igual ou menor em relação ao anual, com uma redução de 9% considerando todas ottobacias.

Em concordância com os resultados encontrados neste estudo, Ruthes et al. (2017), constataram que a adoção da Q95 mensal em relação ao anual, flexibiliza os valores de outorga, tendo um aumento da vazão outorgável no primeiro trimestre (jan, fev e mar) em 91% das estações estudadas e no segundo trimestre (abr, mai e jun) em 66 % das estações; e uma diminuição da vazão outorgável no terceiro trimestre (jul, ago e set) e quarto trimestre (out, nov e dez), sendo outorgados valores maiores do que a capacidade dos corpos hídricos, em 75% e 60% das estações, respectivamente.

Utilizando a Q90 anual e os percentis de 75 e 80%, limite máximo de captações em recursos hídricos a serem outorgados nas bacias hidrográficas do Estado do Tocantins;

Maranhão, Bahia e no Distrito Federal, respectivamente, como critério de outorga em todas as ottobacias do Cerrado, observa-se uma disponibilidade hídrica potencial total na região equivalente a 9.926 e 10.587 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Utilizando-se esse mesmo critério e tomando-se o mês de março como referência, nota-se que as ottobacias apresentaram uma maior disponibilidade hídrica potencial em relação a Q90 anual em 100% das ottobacias do Cerrado, tendo um aumento médio de 130% considerando a disponibilidade hídrica potencial total no Cerrado. Para o mês de outubro, observou-se que na maioria, 86,9%, das ottobacias a disponibilidade hídrica potencial seria igual ou menor em relação ao anual, com uma redução de 11% considerando todas ottobacias.

Corroborando com os resultados encontrados neste estudo, Silva et al. (2015), em estudo sobre a influência da sazonalidade nos diferentes critérios de outorga na bacia do rio Paraopeba, sendo a maior parte situada no Cerrado, os autores observaram que a adoção da Q90 no quadrimestre chuvoso (dez, jan, fev e mar) em relação ao critério anual, flexibilizou os valores de outorga, aumento em 99%; já a adoção no quadrimestre seco (ago, set, out e nov), houve redução dos valores das vazões de referência em 24,5%.

Comparando os diferentes critérios de outorga adotados no bioma Cerrado, os utilizados em algumas UPGRHs do estado de Minas Gerais que concedem 30% da Q7,10 anual, são as mais restritivas. A disponibilidade hídrica potencial total no Cerrado, computada somando-se a disponibilidade hídrica potencial em cada ottobacia, com base em 30% da Q7,10 anual, seria igual a 3.286 m<sup>3</sup>/s. Utilizando como base o critério 70% da Q95 anual, utilizado pela ANA nos rios de domínio Federal, a disponibilidade hídrica potencial total no Cerrado seria igual a de 8.602 m<sup>3</sup>/s. Utilizando como base 80% da Q90, critério adotado pelos estados do Maranhão, Bahia e Distrito Federal, critério menos restritivo, a disponibilidade hídrica potencial total no Cerrado seria igual a 10.587 m<sup>3</sup>/s.

Diante dessas avaliações, constata-se que os diferentes critérios de vazões mínima de referência anuais e as porcentagens outorgáveis adotados pelos Estados e Distrito Federal que compõem o bioma Cerrado, podem ser fatores de restrição quanto ao desenvolvimento de algumas ottobacias no Cerrado, uma vez que limita o uso dos recursos hídricos, em alguns estados da federação. Essa limitação pode, em alguns casos, chegar a aproximadamente 300%, principalmente, para parte úmida do Cerrado, e a não ter diferença na disponibilidade hídrica potencial para regiões mais seca, uma vez que as vazões são iguais a zero, quando comparado o critério mais restritivo com o menos restritivo.

### 3.3. Disponibilidade hídrica potencial no Cerrado com base nas vazões outorgáveis

Na Figura 9 apresenta-se a disponibilidade hídrica potencial total, ou seja, considerando a área total do Cerrado, calculada com base nas Q7,10; Q95 e Q90, mensais (M) e anuais (A).

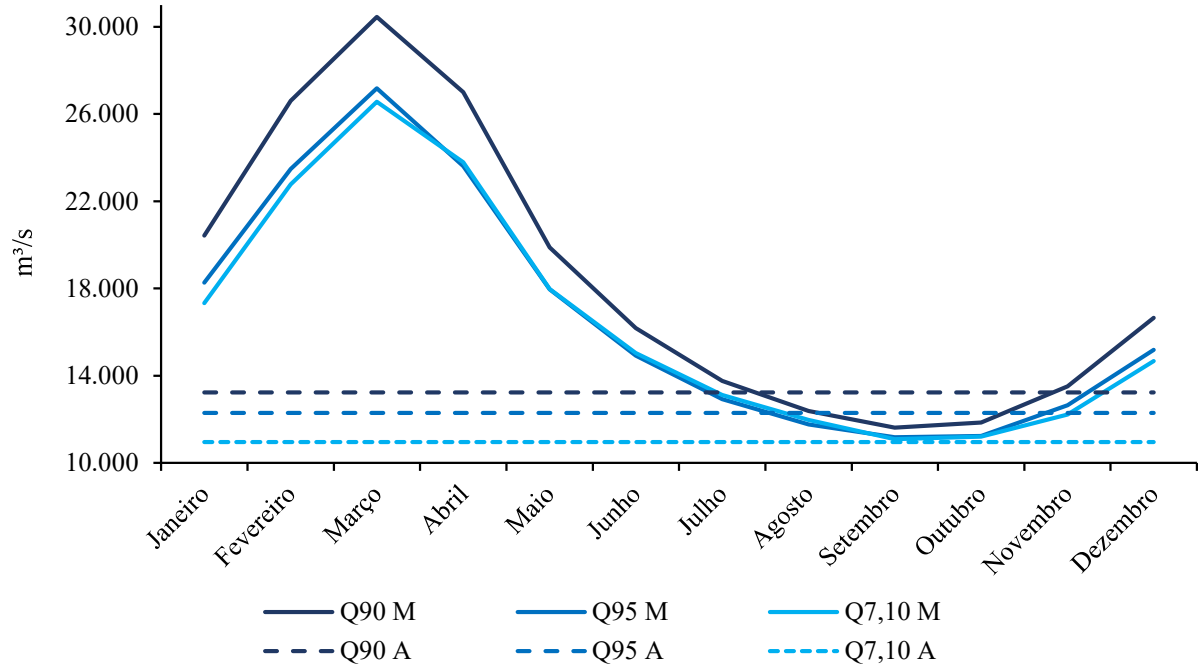


Figura 9 - Disponibilidade hídrica potencial total do Cerrado calculada com base nas Q7,10M; Q95M e Q90M mensais e nas Q7,10A; Q95A e Q90A anuais.

Como pode ser observado na Figura 9, a disponibilidade hídrica potencial total anual é maior quando se utiliza a Q90, seguida da Q95 e Q7,10, com valores de 13.234,1 m³/s; 12.288,6 m³/s e 10.954,0 m³/s, respectivamente. As vazões de referência mensal seguem o mesmo padrão das vazões anuais, exceto que a Q7,10 é superior a Q95 nos meses de abril a agosto.

Comparando os critérios anual e mensal em relação a permissão e a restrição, a Q7,10 é, de maneira geral, a mais restritiva entre elas. Entretanto nos meses de setembro e outubro, não se observa diferença significativa entre a disponibilidade hídrica potencial pela Q7,10M, Q7,10A e Q95M. Nos meses chuvosos, de maneira geral, as vazões de referência mensal possibilitam uma maior disponibilidade hídrica potencial quando comparado ao critério anual. De julho a novembro, esse fato é verdadeiro apenas para a Q7,10.

Para os meses compreendido ao período de maior disponibilidade hídrica potencial, levando em consideração, por exemplo, o mês de março, quando comparado aos critérios anuais, ter-se-ia um incremento de 142,5% na Q7,10; 130% na Q90; e 121,2% na Q95, ou seja, um aumento de 15.608,63 m³/s; 17.211,2 m³/s e 14.892,2 m³/s, respectivamente.

Na Figura 10 apresenta-se o potencial da área irrigável no Cerrado, calculada com base na disponibilidade hídrica potencial total considerando os diferentes critérios de outorga mensais (M) e anuais (A).

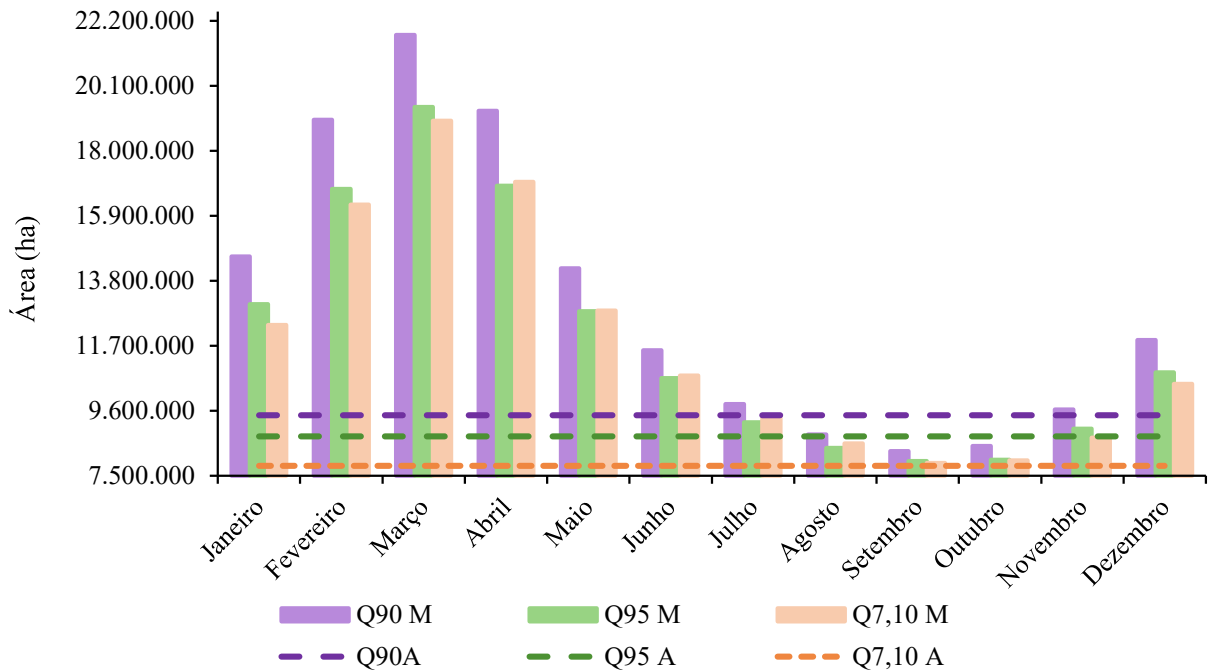


Figura 10 - Potencial de área irrigável no Cerrado, calculada com base na disponibilidade hídrica potencial total considerando a Q7,10M; Q95M e Q90M mensais e nas Q7,10A; Q95A e Q90A anuais.

Os diferentes critérios de outorga podem ser fator de permissão ou restrição ao uso de recursos hídricos. Utilizando-se a Q7,10 anual, por exemplo, ter-se-ia uma área irrigável de aproximadamente 7.824.252 ha, em todos os meses do ano, enquanto as áreas possíveis de serem irrigadas utilizando-se a Q95 e Q90 anuais seriam iguais a 8.777.566 ha e 9.452.948 ha, respectivamente. A Q7,10 anual é o critério mais restritivo, no entanto, nos meses de estiagem, ela condiz mais com os padrões de vazões do período, uma vez que, por exemplo, setembro, mês de estiagem, o potencial para irrigar é de 7.917.945 ha para Q7,10; 7.980.197 ha para Q95; e 8.294.590 ha para Q90.

Analisando a vazão outorgável mensal e tomando como exemplo o mês de março, mês de maior disponibilidade, tem-se um potencial para irrigar uma área de aproximadamente 18.973.273 ha para Q7,10; 19.141.877 ha para Q95; e 21.746.687 ha para Q90, tendo um aumento equivalente a 11.149.021; 10.637.311 e 12.293.739 ha, respectivamente, quando

comparado ao potencial anual, podendo esse aumento ser expressivo para o desenvolvimento da agricultura irrigada.

Atualmente, os 1,55 Mha plantados sob pivô central no Brasil, 73% deles, ou seja, 1,14 Mha, estão localizados no Cerrado (ANA, 2021). E é estimado que até 2030 a área irrigada no Brasil terá um incremento de 3,64 Mha, sobre a área atual (ANA, 2017a). Diante dessa perspectiva e dos resultados encontrados sobre o potencial da disponibilidade hídrica nas ottobacias do Cerrado, o bioma tem grande potencial para o desenvolvimento da agricultura irrigada, uma vez que a gestão hídrica for realizada de maneira eficiente.

A perspectiva de aumento da área cultivada e irrigada no Cerrado são nos meses em que a retirada de água ocorre sem comprometer os requisitos ambientais. Sendo nos meses de novembro a junho (Figura 9), onde os critérios mensais permitem uma maior retirada de água em relação ao critério anual. Nos meses de estiagem, em que o fluxo de água é baixo, os valores a serem outorgados devem respeitar a disponibilidade nos cursos d'água para os usuários e da vazão remanescente requerida para conservação do meio ambiente, mesmo que nesses períodos tenha um maior requerimento de água pelos cultivos irrigados. Nesse cenário em que é requerido um volume maior de água por parte dos plantios irrigados, ser deve-se ter alternativas que sejam compatíveis com cada ottobacia e cultivo. Alguns exemplos de estratégias para isso poderia ser a irrigação deficitária, ou a construção de barragens, onde a água proveniente do período de maior excedente hídrico, pode ser armazenada e disponibilizada no período de maior necessidade hídrica.

Estudos que levam em consideração a variabilidade sazonal das vazões para a determinação do critério de outorga podem auxiliar os órgãos que têm o objetivo de otimizar a gestão hídrica, sendo de interesse fazer com que o uso da água se dê de forma racional, tendo em vista os benefícios econômicos e sociais, além dos ambientais (PRUSKI et al., 2014). Assim, o conhecimento a respeito da disponibilidade hídrica ao longo do ano deve ser uma informação básica e fundamental para as tomadas de decisão em relação aos processos de outorga, havendo assim, a necessidade de progredir nos critérios de outorga com estudos mais avançados para suprir tal carência de informações (ARAI, 2020).

O uso de critérios baseados em vazões mensais como índices de referência para definição de critérios para concessão de outorga, ao invés de valores anuais, apresenta um expressivo potencial para aumento da quantidade de água permissível para outorga, no período em que há maior disponibilidade hídrica e impõe uma restrição mais realista no período crítico de disponibilidade de água, sem aumento do risco da escassez hídrica ou que possam causar comprometimento ambiental por não manterem o remanescente ambiental (OUYANG, 2012; BOF et

al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013; GOMES; FERNANDES, 2017; RAMOS et al., 2017). Podendo dessa forma o critério mensal ser uma excelente opção para melhorar o uso da água para reduzir conflitos entre os usuários (PRUSKI et al., 2014).

De acordo com Serrano (2020), nesse cenário de aumento constante das demandas hídricas, os órgãos gestores de recursos hídricos precisam gerenciar melhor as variações hidrológicas dentro de uma bacia. Sendo o entendimento dos padrões mensais de vazão e de sazonalidade imprescindíveis para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos, uma vez que em uma escala de tempo menor pode aumentar as chances de que a vazão estimada seja compatível com a real disponibilidade hídrica em um determinado período. Corroborando com os resultados encontrados neste estudo, os critérios para concessão de outorga poderiam ser adotados de maneira sazonal, considerando as vazões mensais, sendo de grande valia, principalmente nas estratégias de expansão das atividades econômicas desenvolvidas no Cerrado, como, por exemplo, da agricultura irrigada.

#### **4. Conclusões**

Observou-se que em média nas ottobacias do Cerrado, a disponibilidade hídrica potencial da Q90 anual é 8% maior que a Q95 anual e 22% maior que Q7,10 anual. A média da disponibilidade hídrica potencial para ser outorgada entre as ottobacias do Cerrado pelos critérios anuais é de 2,42 m<sup>3</sup>/s para Q7,10; 2,71 m<sup>3</sup>/s para Q95; e 2,92 m<sup>3</sup>/s para Q90.

Constatou-se que as maiores vazões mínimas de referência mensal ocorreram em março, tendo uma média da disponibilidade hídrica potencial para ser outorgada entre as ottobacias do Cerrado de 5,86 m<sup>3</sup>/s para Q7,10; 6,00 m<sup>3</sup>/s para Q95; e 6,72 m<sup>3</sup>/s para Q90. Já o mês de menores vazões mínimas de referência foi em outubro, tendo uma média da disponibilidade hídrica potencial para ser outorgada entre as ottobacias do Cerrado de 2,47 m<sup>3</sup>/s para Q7,10; 2,48 m<sup>3</sup>/s para Q95; e 2,61 m<sup>3</sup>/s para Q90.

Os diferentes critérios de vazões mínima de referência anuais e as porcentagens outorgáveis adotados pelos estados que compõem o bioma Cerrado, podem ser fatores de restrição quanto ao desenvolvimento de algumas ottobacias no Cerrado, uma vez que limita o uso dos recursos hídricos, em período de maior disponibilidade hídrica potencial, em alguns estados da federação, e nos períodos de estiagem são concedidas vazões superiores que não condizem com a realidade.

A diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica potencial das vazões mensais em relação à vazão anual entre os critérios adotados evidenciou maior permissividade do uso

da água nos meses de julho a outubro, ou seja, a disponibilidade hídrica potencial anual foi maior do que a disponibilidade hídrica potencial nesses meses, principalmente na Q95 e Q90.

Estimou-se um potencial de área irrigável para o Cerrado de 7.824.252 ha para a vazão outorgável da Q7,10 anual; 8.777.566 ha para Q95 anual; e 9.452.948 ha para Q90 anual. O potencial de área irrigável considerando a vazão outorgável do mês de março para os critérios da Q7,10; Q95; e Q90, foram de 18.973.273 ha, 19.141.877 ha, e 21.746.687, respectivamente, ter-se-ia um incremento de 142,5% na Q7,10; 130% na Q90; e 121,2% na Q95.

## **5. Recomendação**

Diante do aumento da demanda hídrica, os órgãos outorgantes precisam gerenciar melhor as variações ocorridas nas bacias hidrográficas. Dessa forma, para que se tenha um planejamento e gestão das bacias hidrográficas do Cerrado de forma eficaz, os critérios de concessão de outorga poderiam ser adotados de maneira mensal, considerando a sazonalidade das vazões, uma vez que em escala de tempo menor pode aumentar as chances de que a vazão estimada seja compatível com a real disponibilidade nas bacias para um determinado período. Essa medida reduziria risco associados à ocorrência de vazões anuais mais permissivos do que as vazões mensais, como observado na Q95 e Q90, no período de estiagem, e reduziria o nível de restrição, como observado na Q7,10, no período chuvoso.

## 2.2 Artigo 2

### Variabilidade espaço-temporal do balanço hídrico climatológico em bacias hidrográficas do Cerrado

Artigo publicado:

Spatial–Temporal Variability of Climatic Water Balance in the Brazilian Savannah Region River Basins. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1820, 10 maio 2023.

<https://doi.org/10.3390/w15101820>

**Resumo:** O quadro de escassez hídrica tem se acentuado em diversas regiões do mundo, muito do agravamento dessa situação se deve às variações climáticas que impactam diretamente a dinâmica do ciclo hidrológico. A avaliação dos ciclos da água e energia a partir da estimativa do balanço hídrico, além de ser uma forma de se entender a dinâmica hídrica das bacias hidrográficas em relação a essas mudanças, é um instrumento fundamental para avaliar o potencial hídrico de uma região, especialmente em regiões como a do Cerrado, onde o crescimento desordenado contribuiu para o aumento das disputas pelo uso da água. Dessa forma, objetivou-se com esse estudo avaliar o déficit e o excesso hídrico mensal provável em bacias hidrográficas do Cerrado e a tendência dos dados mensais de balanço hídrico climatológico (BHC) e de suas variáveis de entrada na região de estudo. Para realização do presente estudo, foram utilizados os dados mensais de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) no período de janeiro de 2003 a dezembro de 2019. O déficit e o excesso hídrico mensal provável foram obtidos a partir do BHC mensal, calculado pela diferença entre a P e ET<sub>o</sub> mensal em cada uma das 4.531 ottobacias (nível 5) do Cerrado. Para isto, utilizou-se como referência a frequência igual ou superior a 80% de permanência no tempo. A análise de tendência foi aplicada aos dados mensais de BHC, P e ET<sub>o</sub>. No período chuvoso, a maioria das ottobacias apresentaram BHC positivo, em fevereiro, por exemplo, foram em 79% das ottobacias. Já no período de menor disponibilidade hídrica, a maioria das ottobacias apresentaram balanço negativo, em setembro, por exemplo, 100% das ottobacias o BHC foi negativo. Em todos os meses verificou-se alguma ottobacia com tendência significativa tanto para o BHC, como para a P e a ET<sub>o</sub>. Sendo essas tendências na maioria das situações de decréscimo para o BHC e P mensal e de aumento para a ET<sub>o</sub> mensal.

**Palavras-chave:** Disponibilidade Hídrica, Gestão Hídrica, Estacionariedade, Savana brasileira.

## 1. Introdução

A região do Cerrado Brasileiro responde por cerca de 45% da área agrícola nacional, sendo responsável pela produção de 35% da bovinocultura, 52% da soja, 52% da cana-de-açúcar, 54% do milho e 96% do algodão (ASSAD et al., 2020; BOLFE et al, 2020; CONAB, 2018; IBGE, 2018b). Além disso, nesse bioma estão presentes 15% dos estabelecimentos agropecuários, onde são gerados 32% da renda bruta agrícola do país, e os cultivos agrícolas anuais

correspondem a 40% da produção total do país (BOLFE et al., 2020). Além disso, o Bioma Cerrado desempenha um papel importante na dinâmica dos recursos hídricos, uma vez que abriga trechos de 10 das 12 regiões hidrográficas do Brasil (OLIVEIRA et al., 2014).

Cerca de 70% dos 204 milhões de hectares do Cerrado tem potencial para desenvolvimento da agricultura (FRANCISCO; KAPPES, 2012). A intensificação da agricultura na região é uma das principais estratégias para reduzir desequilíbrios no ecossistema. Neste contexto, a agricultura irrigada, principal usuária de recursos hídricos, é uma das técnicas mais promissoras. No entanto, o maior desafio reside em conciliar sua expansão com a disponibilidade de recursos hídricos, especialmente em regiões já afetadas pela escassez hídrica (RODRIGUES, 2017).

Até 2030, estima-se que a área irrigada no Brasil aumentará em 3,64 milhões de hectares, o que equivale a um aumento de 45% em relação à área atual, representando um crescimento médio de 200 mil hectares por ano (ANA, 2017a). Aproximadamente 64% da área irrigada no Brasil concentra-se na região do Cerrado (BRASIL, 2014), na qual detém cerca de 80% dos pivôs centrais do país (ALTHOFF; RODRIGUES, 2019). Dado o cenário atual de uso dos recursos hídricos na região e o potencial para conflitos (CAMBRAIA NETO; RODRIGUES, 2021), torna-se essencial avaliar e aprimorar ferramentas que possam auxiliar na gestão de recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica. Nessa região, produzir mais com menos água torna-se cada vez mais importante.

Devido as variações que ocorrem no ciclo hidrológico, do uso demasiado de recursos hídricos e da pouca efetividade de programas de manejo e gestão de água, o quadro de escassez hídrica tem se acentuado em diversas regiões do mundo (BUREK et al., 2016; SALIS et al., 2017). As alterações que ocorrem no ciclo hidrológico poderão ter influência direta na chuva (quantidade, periodicidade e duração), evaporação, temperatura, escoamento e, desta forma, influenciam na disponibilidade de água e ocorrência de eventos extremos (SANTOS et al., 2021; RÁPALO et al., 2021), os quais afetam expressivamente os aspectos socioeconômicos, ambientais e agrícolas (BEHZADI et al., 2022).

A avaliação dos ciclos da água e energia a partir da estimativa do balanço hídrico, além de ser uma forma de entender a dinâmica das bacias hidrográficas em relação a essas mudanças (MOREIRA et al., 2019), é um instrumento que permite avaliar o potencial hídrico de uma região (ANA, 2017b). O entendimento do balanço hídrico, mesmo que simplificado, é importante para a compreensão dos processos de degradação e conservação dos recursos hídricos (SOUZA et al., 2017).

Segundo Berghuijs et al. (2014), o balanço hídrico sazonal tem uma marca nas assinaturas da variabilidade da vazão (vazões mínimas a vazões máximas) ao longo do tempo. Em geral, o balanço hídrico sazonal tem se mostrado uma métrica que estabelece uma conexão entre as respostas hidrológicas de curto prazo e a adaptação da paisagem às condições climáticas de longo prazo.

De acordo com Jesus et al. (2017) e Souza et al. (2017), informações quantitativas das variáveis precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), bem como do balanço hídrico climatológico (BHC), são de grande importância na análise de severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos. Essas informações são também importantes para a avaliação da disponibilidade hídrica e da ocorrência de eventos extremos, como secas e inundações, fundamental para uma gestão eficiente de recursos hídricos (MOREIRA et al., 2019).

Diante das mudanças causadas pelas atividades antropogênicas sobre o clima, bem como o seu potencial impacto sobre o ciclo da água, é importante conhecer as condições da superfície terrestre e da atmosfera (MOREIRA et al., 2019). O fluxo líquido de água na superfície terrestre (diferença entre a precipitação e a evapotranspiração) que, sobre os continentes, corresponde à soma do escoamento superficial e subterrâneo, é um aspecto chave do ciclo da água (BYRNE; O'GORMAN, 2015).

Segundo Assad et al. (2020), as mudanças climáticas são evidentes na região do Cerrado. O aumento da temperatura implica no aumento da evapotranspiração potencial e não necessariamente ocorre aumento da precipitação e, desta forma, tem-se um aumento expressivo do déficit hídrico. Essas alterações esperadas nas variáveis climáticas poderão resultar em alterações no regime hidrológico e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica e nos processos de alocação de água (FERREIRA et al., 2021b). Além disso, as anomalias nessas variáveis climáticas são as principais causas da baixa produtividade. Desta forma, o monitoramento da dinâmica do clima é de extrema importância para otimização da produção agrícola (PASSOS et al., 2017).

Neste cenário, é importante conhecer quais as regiões apresentam maior risco de comprometimento da disponibilidade hídrica para atender às demandas de água. Esse conhecimento é fundamental para o planejamento estratégico de desenvolvimento econômico de uma região. O balanço hídrico é uma das ferramentas que pode ser utilizada para essa finalidade. Uma vez que retratam o comportamento do regime hídrico, assim como fizeram Cassettari e Queiroz (2020) em estudo sobre o balanço hídrico em uma bacia hidrográfica na área de transição do Bioma Cerrado e Amazônia.

Vários estudos relacionados ao balanço hídrico climático foram conduzidos em partes do Cerrado (CARVALHO et al., 2011; CASSETTARI; QUEIROZ, 2020; D'ANGIOLELLA, 2007; OLIVEIRA, 2023; SANTOS et al., 2022; SOARES et al., 2003). Para a gestão dos recursos hídricos, porém, é importante avaliar a região de forma integrada. Nesse contexto, objetivou-se com o presente estudo avaliar o déficit e o excesso hídrico mensal provável em bacias hidrográficas do Cerrado e a tendência dos dados mensais de balanço hídrico climatológico (BHC) e de suas variáveis de entrada, a precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) na região de estudo.

## **2. Material e Métodos**

### **2.1 Área de estudo**

A área de estudo compreende o Bioma Cerrado (Figura 1a), que ocupa aproximadamente 24% do território brasileiro, com cerca de 204 milhões de hectares. (MAPBIOMAS, 2020). Adotou-se como referência para as análises a base hidrográfica ottocodificada de nível 5 (ANA, 2014). Essa base é a codificação oficial das bacias hidrográficas no Brasil. No total, foram avaliadas 4.531 ottobacias (Figura 1c).

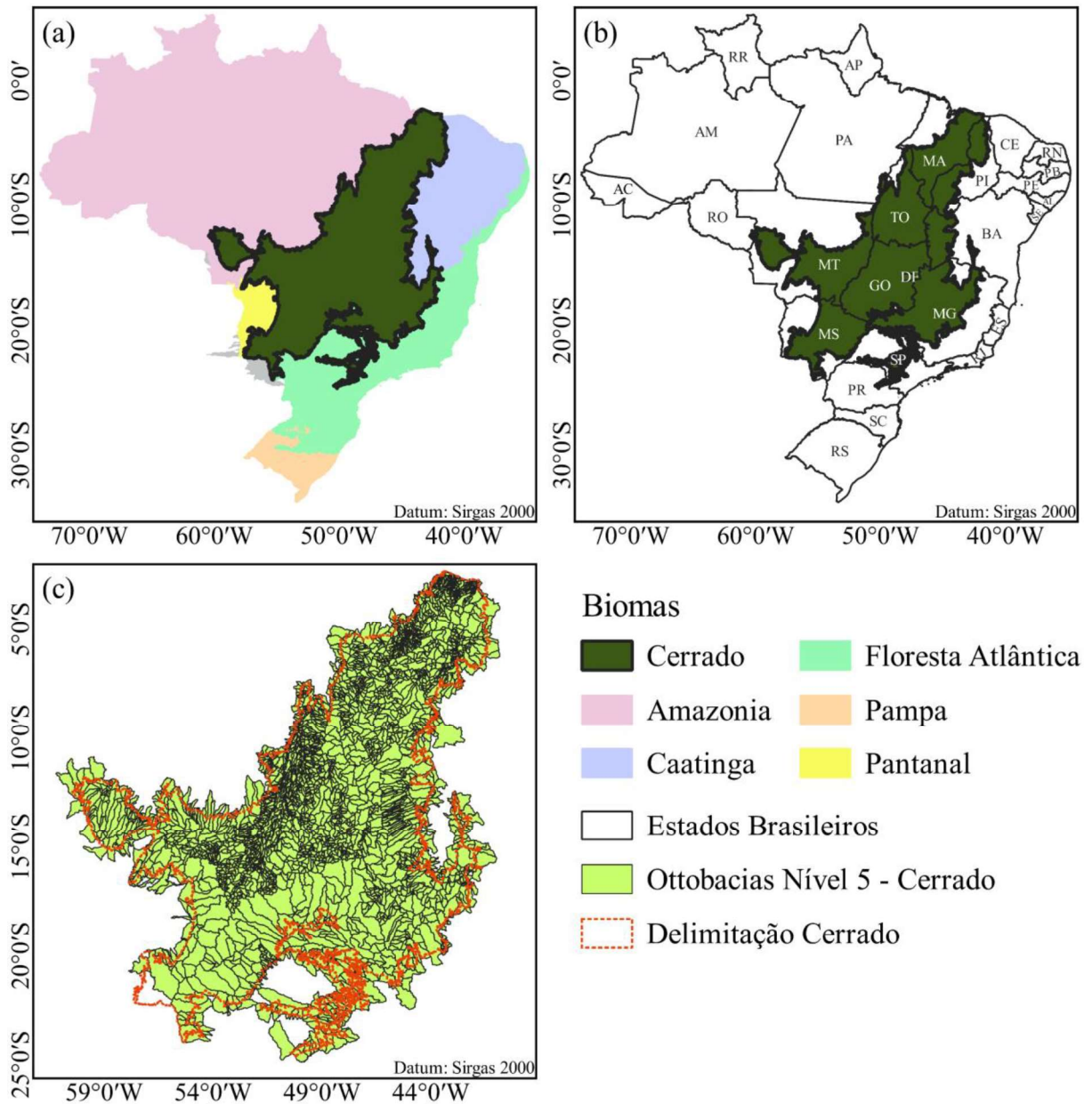


Figura 1 – (a) Distribuição espacial dos Biomas (Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal) no território brasileiro; (b) Bioma Cerrado em relação dos estados brasileiros; e (c) Subdivisão da região do Bioma Cerrado em Ottobacias nível 5.

O Bioma Cerrado é classificado predominantemente como clima tropical de savana (Aw), de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013). O clima do Cerrado é caracterizado por ter duas estações bem definidas: uma chuvosa e uma seca. A estação seca compreende os meses de maio a setembro, e a estação chuvosa, normalmente de outubro a abril, sendo responsável por aproximadamente 90% da precipitação total anual. Em todos os meses do ano a temperatura média do ar é superior a 18 °C e a precipitação no mês mais seco é inferior a 60 mm. (KLINK, 2014; RODRIGUES et al., 2012).

O Cerrado apresenta transição para um clima semiárido quente na fronteira com a Caatinga, para um clima tropical de monções na fronteira com a Amazônia e o Pantanal, e para um clima temperado na fronteira com a Mata Atlântica. Essas áreas de transição são importantes para entender melhor a variação do clima no Cerrado, principalmente, devido à distribuição de chuvas ao longo do ano (ALTHOFF et al., 2021b).

De acordo com o Mapbiomas (2020), o Cerrado possui aproximadamente 53,6% da sua superfície cobertas por vegetação nativa (109,4 Mha); 31,2% por pastagem plantada (63,6 Mha); 11,8% por agricultura anual e perene (24,1 Mha); 1,9% de floresta plantada (3,8 Mha); e 1,5 % por áreas urbanas e outros (3,1 Mha).

## 2.2. Balanço hídrico climatológico (BHC) mensal

Os valores do BHC mensal, em mm, das ottobacias do Cerrado foram obtidos com base no cálculo da diferença entre a P e a ETo mensais ( $BHC = P - ETo$ ), conforme realizado em estudo de Byrne e O’Gorman (2015) e Práválie et al. (2019). Estimou-se o BHC com base na frequência de excedência igual ou superior a 80%. Os cálculos associados a essas estimativas foram desenvolvidos em ambiente R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021).

Os dados de P e ETo para as ottobacias do Cerrado foram obtidos do banco de dados HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022), para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2019. Os dados de P e ETo são gradeados em resolução espacial de  $0,1^\circ$  ( $\sim 100 \text{ km}^2$ ) e o valor médio diário foi extraído para cada ottobacia (com um tamanho médio de  $569 \text{ km}^2$  e uma mediana de  $185 \text{ km}^2$ ). No HydroCerrado, os dados de precipitação diária foram obtidos do Integrated Multi-Satellite Retrievals, para a missão de Global Precipitation Measurement (GPM) (IMERG), (HUFFMAN et al., 2019a; 2019b); e os dados de evapotranspiração de referência diária de Althoff et al. (2020).

Baseado em cada período mensal, a frequência de ocorrência de déficit e de excesso hídrico foi calculada utilizando-se a equação de Kimball (1960), Equação 1.

$$F = \frac{m}{n+1} \quad (1)$$

em que:

F = frequência (%);

m = ordem do evento de déficit e/ou de excesso hídrico; e

n = número de observações.

### **2.3. Análise de estacionariedade das séries histórica do balanço hídrico climatológico (BHC) mensal, precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo)**

A aplicação do teste de estacionariedade aos dados foi com o intuito de analisar se o BHC apresenta tendência ou não. As variáveis de entrada, P e ETo, foram também analisadas para ver se há ou não tendência e a influência sobre o BHC mensal nas ottobacias do Cerrado.

Para análise de tendência dos dados históricos do BHC, da P total mensal e da ETo total mensal nas ottobacias do Cerrado, aplicou-se o teste de Run (THOM, 1966) para avaliar a aleatoriedade das séries. O teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) foi utilizado para avaliar se as séries de dados apresentavam tendência temporal de alteração estatística significativa, podendo essas mudanças serem negativas ou positivas. O teste de Pettitt (PETTITT, 1979) foi aplicado para confirmar se houve ou não estacionariedade. Por fim, o teste de Sen Slope (SEN, 1968; HIRSCH et al., 1982) foi utilizado para medir a magnitude das tendências. Os testes foram aplicados considerando-se um nível de significância de 5% (MUDBHATKAL et al., 2017; FERREIRA et al., 2021a).

Os cálculos associados a todos os testes de tendência foram desenvolvidos em ambiente R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021), por meio dos pacotes: “randtests” função “runs.test”, “Kendall” função “MannKendall” e “trend” funções “pettitt.test” e “sens.slope”.

## **3. Resultados e Discussão**

### **3.1. Evapotranspiração de referência (ETo) e Precipitação (P) no Cerrado**

A média da evapotranspiração de referência (ETo) e precipitação (P) total anual entre os anos de 2003 e 2019 das ottobacias do Cerrado estão representadas na Figura 2. Na Figura 2a constata-se uma expressiva variação na média da ETo total anual, com valores oscilando entre 1.060 e 1.903 mm, e média de 1.563 mm, com aumento da ETo de Oeste para Leste e do Sul para Norte. Já para a média da P total anual (Figura 2b) a oscilação ocorreu entre 700 e 2.063 mm, e média de 1.471 mm, com redução da precipitação de Oeste para Leste e do Sudoeste para o Nordeste, corroborando com estudo de Sano et al. (2019).

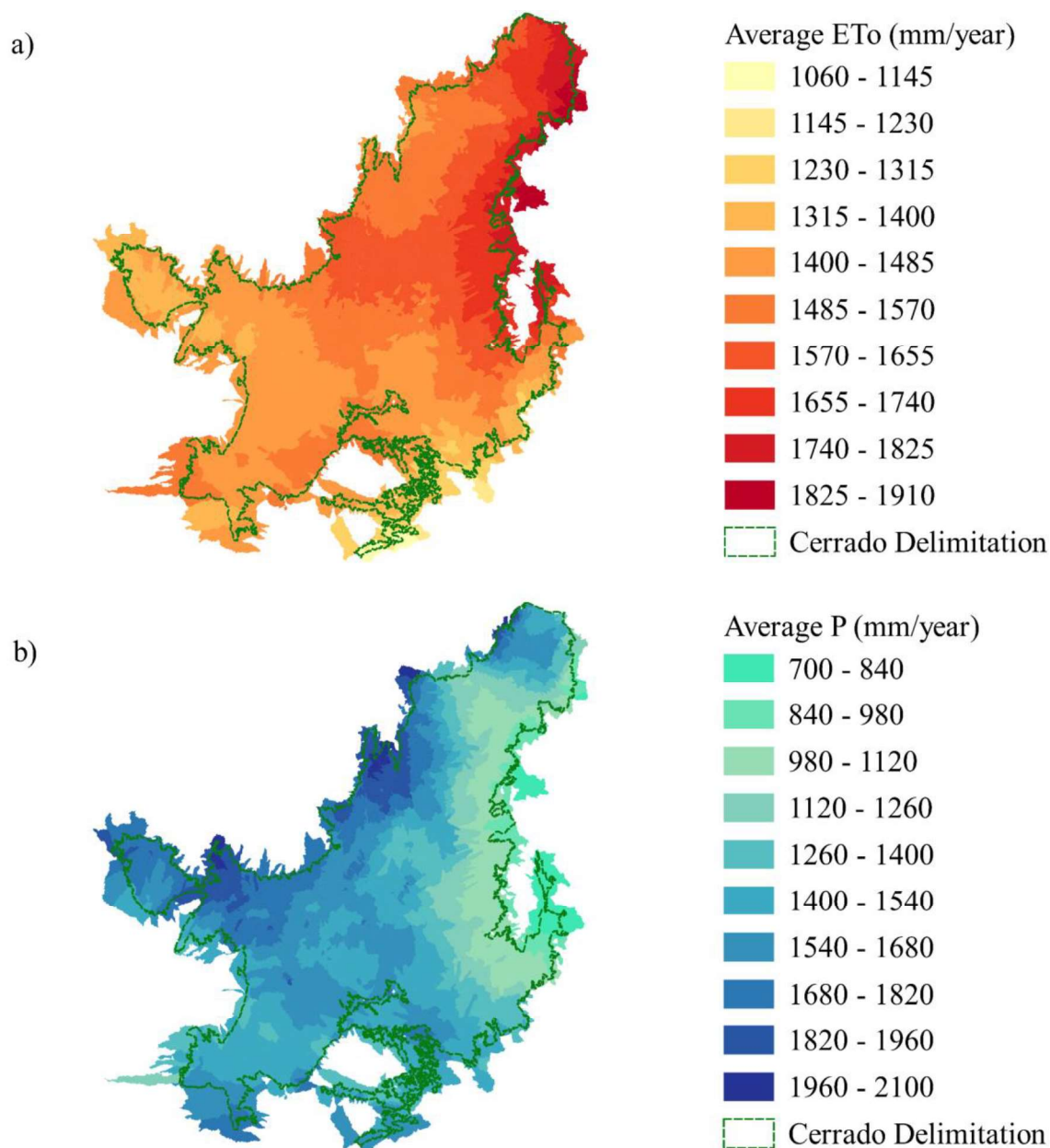


Figura 2 – Média da evapotranspiração de referência - ETo (a) e precipitação - P (b) total anual para as ottobacias do Cerrado.

A maior média da ETo total anual foi de 1.902,6 mm na ottobacia 74453 localizada entre os municípios do Ribeira do Piauí e São José do Peixe no estado do Piauí (PI-localização, Figura 1), na região de transição entre os biomas Cerrado e Caatinga. Já a menor média da ETo foi de 1.061 mm na ottobacia 86424 localizada entre os municípios de Tibagi, Ventania e Pirai do Sul no estado do Paraná (PR-localização, Figura 1), na região de transição entre o bioma Cerrado e Mata Atlântica. Analisando mensalmente a ETo, a maior média mensal ao longo dos anos foi de 205,4 mm, observada no mês de outubro, na ottobacia 74277, localizada entre os municípios de Juazeiro do Piauí, Castelo do Piauí e Buriti dos Montes, no estado do Piauí,

região também localizada na área de transição do Cerrado e Caatinga. Já o mês de menor média mensal ocorreu em junho com 46,9 mm, também na ottobacia 86424, entre o bioma Cerrado e Mata Atlântica.

Althoff et al. (2020), avaliando a ETo no Brasil, constatou que os maiores valores de ETo geralmente acontecem durante o mês de outubro na região do nordeste, onde ocorrem ondas de calor, com alta radiação solar, temperatura máxima diária chegando a 40°C, baixa umidade relativa (<40%) e alta velocidade do vento. Por outro lado, os autores constaram que a menor média mensal foi observada no mês de junho, na região Sul, corroborando os resultados encontrados neste estudo.

Com relação à precipitação, a maior média da P total anual foi de 2.062,7 mm na ottobacia 64432 localizada no município de Araguacema no estado de Tocantins (TO-localização, Figura 1), localizado próxima à área de transição do Cerrado e Amazônia. E a menor média da P total anual foi de 700,9 mm na ottobacia 77692 localizada entre os municípios de Paramirim, Caetité e Livramento de Nossa Senhora no estado da Bahia (BA-localização, Figura 1), localizados na área de transição entre o Cerrado e Caatinga. Analisando mensalmente a P, no período que compreende a estação chuvosa, a maior média pluviométrica mensal ao longo dos anos foi igual a 411,6 mm, observada no mês de janeiro na ottobacia 69413, localizada entre os municípios de São Miguel do Araguaia e Nova Crixás, no estado de Goiás (GO-localização, Figura 1), localizados próximos à área de transição do Cerrado e Amazônia. Já durante a estação seca, a menor média pluviométrica (0,03 mm) foi observada no mês de julho, na ottobacia 74982, localizada entre os municípios de Barreiras do Piauí e Gilbués, no estado do Piauí, também localizados na área de transição do Cerrado com a Caatinga.

Esses resultados corroboram os resultados encontrados por Campos e Chaves (2020) em estudo sobre a variabilidade da precipitação no bioma Cerrado, onde os valores médios da precipitação ocorrem na região central do bioma, os valores inferiores à média regional encontram-se nos estados do Piauí, Bahia e ao Norte de Minas Gerais (MG-localização, Figura 1), na zona de transição com a Caatinga, e os valores superiores à média encontram-se na área de transição com a floresta Amazônica.

De acordo com Althoff et al. (2020), nas regiões com menores valores de ETo, em geral, ocorrem as maiores pluviosidade, uma vez que a precipitação se correlaciona com maior umidade relativa e cobertura de nuvens, levando a uma menor radiação solar que atinge a superfície. Embora exista uma correlação negativa entre ETo e a precipitação, ela não é linear.

### 3.2. Avaliação do déficit e do excesso hídrico mensal

Na Figura 3 apresenta-se o BHC mensal das ottobacias do Cerrado para uma frequência de permanência no tempo igual ou superior a 80%. No período chuvoso, os dados do BHC mostraram que apenas 0,6% das ottobacias (29 ottobacias) apresentaram BHC positivo no mês de outubro, ou seja, essas áreas apresentaram excedente hídrico nesse período. Esse número sobe para 46,7% (2.118 ottobacias) em novembro, 52,7% (2.386 ottobacias) em dezembro, 55,6% (2.519 ottobacias) em janeiro, 78,9% (3.577 ottobacias) em fevereiro, 75,6% (3.426 ottobacias) em março e 26,0 % (1.179 ottobacias) em abril. As 29 ottobacias que apresentaram BHC positivo no mês de outubro, início da estação chuvosa, ou seja, que possuem maior P em relação a ETo, estão localizadas ao Oeste e Noroeste do Cerrado, região de transição com o Bioma Amazônico, de clima tropical com maiores taxas de precipitação (ALTHOFF et al., 2021b).

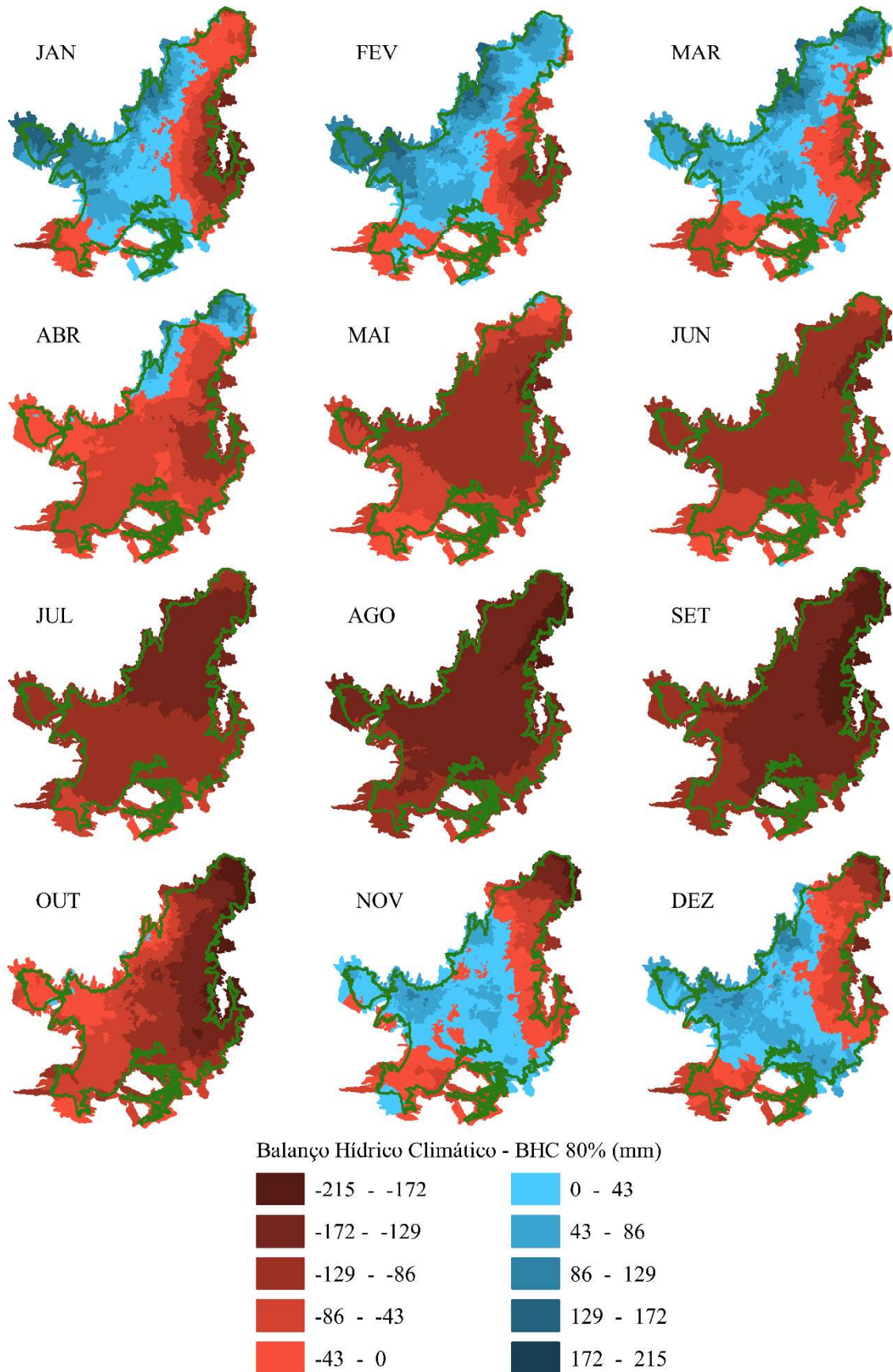


Figura 3 – Balanço hídrico climatológico (BHC) mensal das ottobacias do Cerrado estimados com base na frequência igual ou superior a 80% de permanência no tempo, do período de janeiro de 2003 a dezembro de 2019.

Em relação ao período da estação seca, dos meses de maio a setembro, a maior parte do Cerrado apresentou BHC negativo. Somente os meses de maio e junho apresentaram algumas poucas ottobacias com BHC positivo, sendo em maio 132 ottobacias (2,91%) e junho com apenas 1 ottobacia. (0,02%) Todos os demais meses, de julho a setembro, apresentaram BHC negativo para todas as ottobacias do Cerrado. Em maio, a variação do BHC nas ottobacias, em 80% do tempo, foi de -143,0 mm a 73,4, em junho foi de -151,9 mm a 0,11, em julho foi de -172,9 mm a -26,6, em agosto foi de -195,4 mm a -62,6, e setembro de -208,7 mm a -45,1, sendo os menores valores do BHC observado para as ottobacias da região Leste e Nordeste do Cerrado.

O estudo de Jesus et al. (2017) no qual avaliaram o impacto do aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> no balanço hídrico climatológico no Cerrado, identificou um déficit hídrico observado de abril a setembro, além de um período de seca sem excedente hídrico entre abril e outubro. Esses resultados são consistentes com as descobertas deste estudo. Ao analisar o BHC no cenário futuro, esses autores constataram que haverá uma intensificação do déficit hídrico no período seco. Assad et al. (2020) apontam para um provável aumento dos déficits hídricos no bioma ao longo do século atual, o que pode restringir os diversos usos e aumentar os conflitos pelo uso da água. A agricultura é um dos principais usuários a sofrer as consequências devido à sua vulnerabilidade. Segundo Assad et al. (2020), para que a agricultura se mantenha e aumente sua capacidade produtiva de forma sustentável, é preciso buscar melhores condições de adaptação, como o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas, melhorias no manejo de pastagens e irrigação, e integração da gestão de solo e água. A intensificação sustentável da irrigação pode ser uma ferramenta importante no desenvolvimento agrícola, principalmente nesses períodos em que o P não supre as necessidades de ETo.

Tomando como base as ottobacias 44828, 64136, 64845, 74695, 76987 e 89566, distribuídas em diferentes regiões do bioma Cerrado (Figura 4a), analisou-se os componentes do BHC de janeiro de 2003 a dezembro de 2019, e estão representadas nas Figuras 4b a 4g. Verifica-se diferentes variações da ETo e da P das ottobacias (Figura 4).

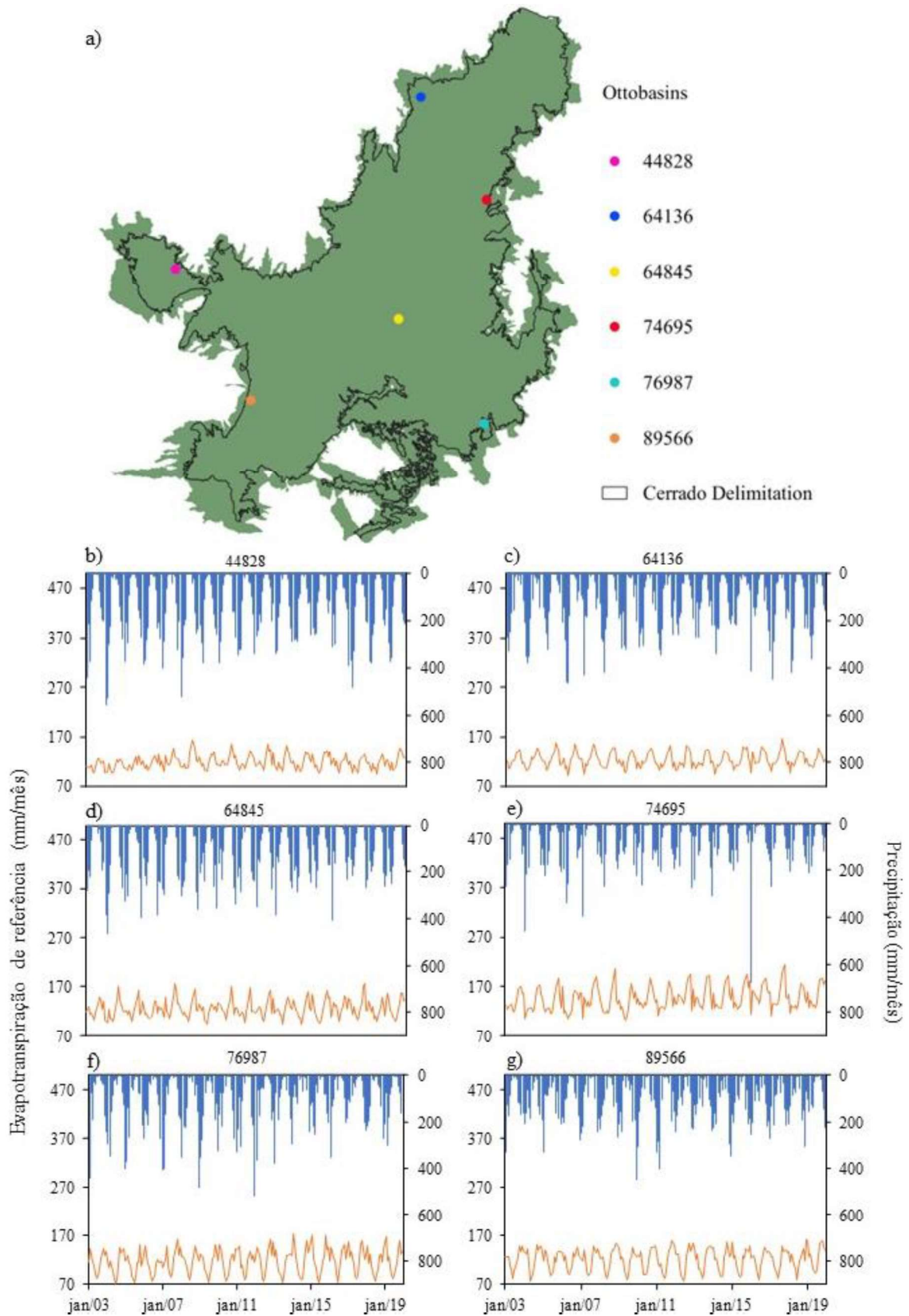


Figura 4 – Localização das seis ottobacias no Cerrado (a), séries de Evapotranspiração de referência (ET<sub>ref</sub>) e Precipitação (P) total mensal para as ottobacias 44828 (b); 64136 (c); 64845 (d); 74695 (e); 76987 (f); e 89566 (g).

A ottobacia 64136 (Figura 4c), localizada ao Norte do estado do Tocantins, e a ottobacia 74695 (Figura 4e), localizada entre o estado do Piauí e da Bahia, apresentaram, de forma geral, picos de P em períodos opostos aos picos de ETo. Já a ottobacia 76987 (Figura 4f), localizada no Centro-Sul do estado de Minas Gerais, e a ottobacia 89566 (Figura 4g), localizada no estado do Mato Grosso do sul (MS-localização, Figura 1), entre os municípios de Rio Verde e São Gabriel do Oeste, apresentaram, de forma geral, picos de P ocorrendo conjuntamente com a ETo. Já as ottobacias 44828 (Figura 4b) localizada na porção Oeste do estado do Mato Grosso (MT-localização, Figura 1), e a 64845 (Figura 4d) localizada no estado de Goiás entre os Municípios de Cocalzinho de Goiás e Padre Bernardo apresentaram um menor descasamento entre os picos de P e ETo. Esses resultados obtidos estão em conformidade com os resultados encontrados através do índice de tempo de precipitação na região do Cerrado por Althoff et al. (2021b).

Analisando mensalmente o BHC com tempo de permanência igual a 80% (Figura 3), para as ottobacias em questão, constatou-se uma elevada variação entre elas. O BHC das ottobacias 44828, 64136, e 64845, acompanha a oscilação entre o período de estiagem e o período chuvoso, com déficit hídrico (valores negativos) e excedente hídrico (valores positivos), respectivamente. Além disso, observou-se que para as ottobacias mais próximas a área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, o valor do excedente hídrico foi maior. As ottobacias 89566 e 76987, localizadas próximas a transição do bioma Cerrado com o Pantanal, clima tropical, e do Cerrado com a Mata Atlântica, clima temperado (ALTHOFF et al., 2021b), respectivamente, essas áreas são caracterizadas, geralmente, por chuvas regulares e as altas temperaturas, o que leva ETo a valores elevados, assim suprimindo a P e tendo o BHC negativo para a maioria dos meses.

Já para a ottobacia 74695, observou-se déficit hídrico em todos os meses, embora esse déficit varie conforme o período chuvoso ou de estiagem, é perceptível que a P não foi suficiente para atender a demanda da ETo em todos os meses do ano. Assim como essa ottobacias, a maioria das ottobacias localizadas ao Leste e Nordeste do Cerrado, observa-se déficit hídrico em todos os meses, sendo o grau de severidade mais acentuado nos meses de estiagem (maio a outubro). A variação de ETo observada nessas ottobacias se deve à fronteira da região com a Caatinga, que apresenta um clima semiárido quente (ALTHOFF et al., 2021b). Essa transição para a Caatinga, no Nordeste do Cerrado, é marcada por ondas de calor, com alta radiação solar e temperaturas máximas diárias chegando a 40 °C. Como a evapotranspiração é amplamente influenciada pela temperatura (PŘÁVĚLIE et al., 2019), levando as regiões Leste e Norte do Cerrado, geralmente, a apresentarem taxas mais altas de aridez (ALTHOFF et al., 2022). Assim,

provavelmente existe uma maior preocupação com as mudanças nas variáveis climáticas nessas áreas de clima semiárido, pois elas afetam o balanço hídrico e a disponibilidade hídrica (DI NUNNO; GRANATA, 2023).

### 3.3. Avaliação da estacionariedade dos dados do balanço hídrico climatológico (BHC) mensal e das variáveis de entrada precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo)

O Teste de Run indicou que às séries de dados temporais das variáveis estudadas são independentes e aleatórias. Em todos os meses foi detectado tendência significativa no BHC para algumas das otobacias (Tabela 1). Na maioria dos meses, a tendência foi de redução do BHC, ou seja, tendência de déficit hídrico. Para o P total mensal, variável de entrada do BHC, em todos os meses, observou-se uma tendência significativa em algumas otobacias (Tabela 1). Em todos os meses, em sua maioria, a tendência foi de redução no total de P. Assim como observado para P, no caso da ETo mensal total, houve uma tendência significativa em todos os meses (Tabela 1). Em todos os meses, em sua maioria, a tendência foi de aumento da ETo total.

Tabela 1. Número de otobacias e percentual com tendência significativa nos dados mensais de balanço hídrico climático (BHC), precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>BHC</b>	665	53	77	18	113	790	745	353	168	97	106	164
<b>%</b>	14,7	1,2	1,7	0,4	2,5	17,4	16,4	7,8	3,7	2,1	2,3	3,6
<b>P</b>	573	69	75	15	169	349	445	278	11	22	127	162
<b>%</b>	12,6	1,5	1,7	0,3	3,7	7,7	9,8	6,1	0,2	0,5	2,8	3,6
<b>ETo</b>	1155	30	304	33	389	1128	1009	725	750	731	95	125
<b>%</b>	25,5	0,7	6,7	0,7	8,6	24,9	22,3	16,0	16,6	16,1	2,1	2,8

A fim de se representar as tendências significativas observadas no BHC mensal e a influência das variáveis de entrada do BHC, P e ETo mensais, nas tendências, para o período chuvoso e o período de estiagem, os meses de janeiro e julho foram utilizados como referência por cobrirem um maior número de otobacias com tendências significativas na área de estudo, e estão representados na Figura 5, estes são os meses que representam, respectivamente, a maior e menor precipitação média na região, a principal variável de entrada no BHC.

Constatou-se que para o mês de janeiro 14,7% das otobacias do Cerrado tiveram tendências significativas de redução no BHC, e estão distribuídas conforme Figura 5. As áreas com reduções significativas no BHC correspondem às áreas com tendência significativa de redução na P, em 12,6% das otobacias, e de aumento da ETo, em 25,5% das otobacias.

Possivelmente a redução observada no BHC, no mês de janeiro, seja devido ao balanço entre a P, com tendência de redução, e a ETo, com tendência de aumento, reduzindo de tal forma o BHC.

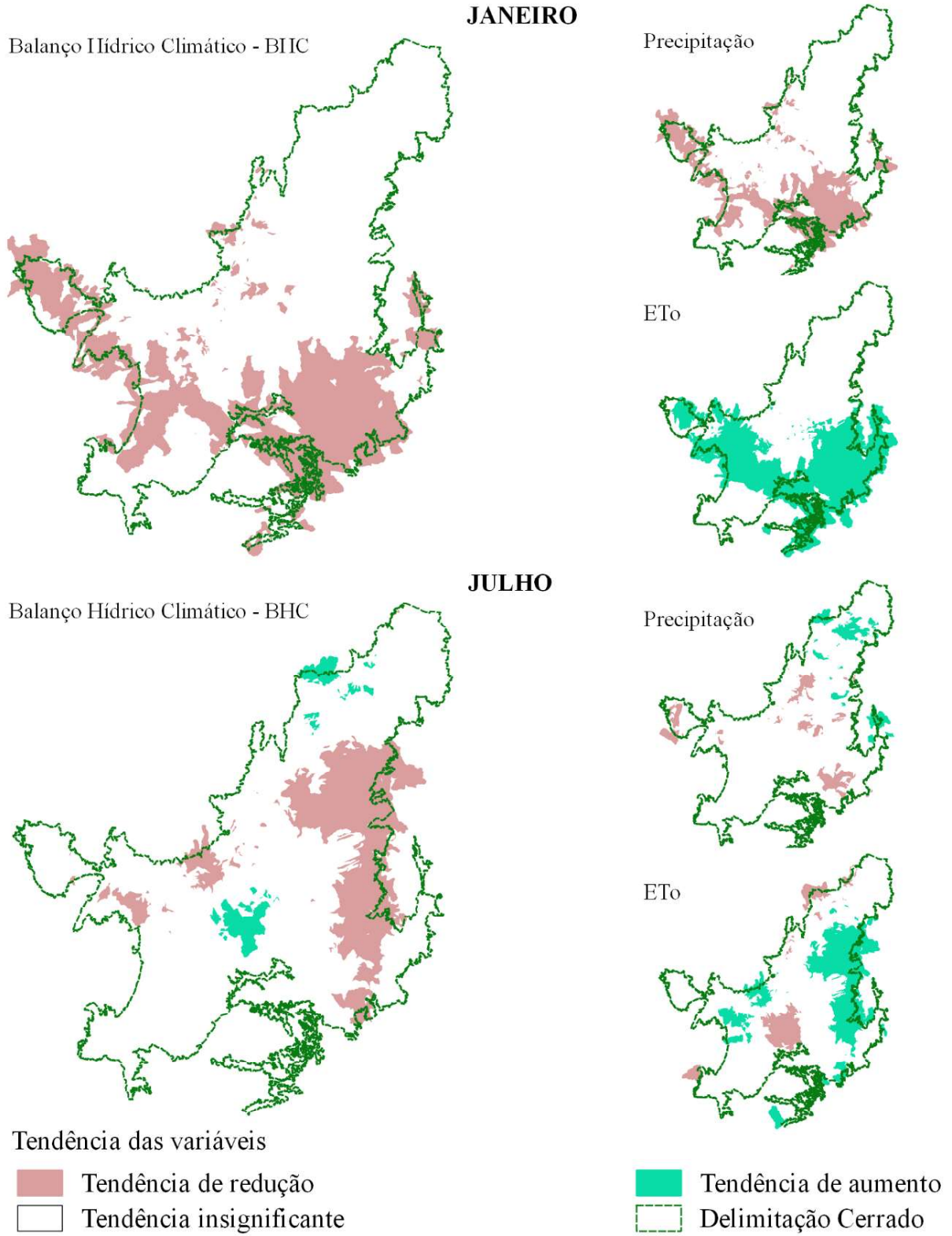


Figura 5 - Tendência do balanço hídrico climatológico (BHC) e das variáveis precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) nos meses de janeiro e julho para as ottobacias do Cerrado.

No mês de julho, o BHC teve tendência significativa em 16,4% das ottobacias do Cerrado, sendo 12,7% com tendência de redução e 3,7% com tendência de aumento. Observou-se tendências na P em 9,9% das ottobacias, sendo 3,9% com tendência de redução e 6,0% com tendência de aumento; já a ET<sub>o</sub> apresentou tendência em 22,3% das ottobacias, sendo 7,2% com tendência de redução e 15,1% com tendência de aumento. Possivelmente, o comportamento das tendências observadas no BHC esteja relacionado às tendências das variáveis de entrada do BHC.

As tendências positivas de P em julho corroboram os estudos realizados por Salviano et al. (2016), em que essa tendência de aumento foi encontrada principalmente nas regiões semi-áridas. Embora haja essa variação nas tendências de aumento e redução de P, a predominância de tendência de redução da precipitação na região do presente estudo corrobora com os resultados obtidos por Assad et al. (2020), no qual também verificou variações em relação à precipitação no Cerrado, com indicações tanto de aumento como de redução, porém, de forma geral, houve uma predominância de redução da precipitação. Outro estudo que corrobora os resultados aqui encontrados é o realizado no Cerrado por Campos e Chaves (2020), que constatou que 14% das estações avaliadas apresentaram tendência de redução da precipitação em janeiro e, em julho (estação seca), redução da precipitação em 76% das 125 séries históricas analisadas.

Os resultados de evapotranspiração que corroboram com os encontrados neste estudo foram os de Salviano et al. (2016), que encontraram alta porcentagem de tendências positivas na evapotranspiração, principalmente na parte Central do país, região condizente com a constatação feita por este estudo no bioma Cerrado. De acordo com Beebe et al. (2014), o aumento da evapotranspiração pode causar redução na vazão. Sousa e Moura (2022), em estudo realizado em Goiás, Centro do Cerrado brasileiro, encontraram alta correlação negativa entre evapotranspiração e vazão, com tendência de aumento de 29,3% na evapotranspiração e tendência de redução na vazão em 2010 e 2020.

Siqueira et al. (2021), em estudo sobre mudanças climáticas em uma bacia do Cerrado, encontraram redução na vazão, pois o aumento da evapotranspiração reduz a disponibilidade de água nos solos e lençóis freáticos e altera os fluxos de energia. A redução da vazão compromete a disponibilidade para usos múltiplos da água e pode ocasionar a formação de ilhas e depósitos de areia, restringindo a navegação e acelerando a degradação do curso d'água

(EGGER et al., 2021), além de intensificar os conflitos decorrentes da dificuldade de compatibilização as demandas com a disponibilidade (SIQUEIRA et al., 2021).

Dentre as ottobacias que apresentaram tendência significativa, a média da magnitude de variação do BHC mensal, bem como da P e da ETo mensais está representado na Tabela 2. Analisando a Tabela, por exemplo, para o mês de janeiro observa-se BHC = -13,3 mm. Esse valor é a média de 665 ottobacias (14,7%) com tendência significativa. Esse valor negativo, nesse caso, significa que em média a tendência é de redução em 13,3 mm por ano, tendo para o período de 2003 a 2019, uma média de redução de aproximadamente 226 mm para o BHC nas ottobacias.

Tabela 2 – Magnitude da variação média mensal do balanço hídrico climatológico (BHC), precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ETo) pelo teste de Sen Slope nas ottobacias com tendência significativa

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
	(mm)											
<b>BHC</b>	-13,3	-8,2	-1,4	-0,9	-3,6	-3,0	-0,4	-1,2	-0,2	-1,4	4,5	-10,2
<b>Precipitação</b>	-11,7	-8,2	-1,9	1,6	-2,8	-5,2	0,1	-0,7	0,5	-3,7	5,7	-9,0
<b>ETo</b>	2,1	-1,2	0,6	-1,0	0,6	0,6	0,4	0,2	0,6	0,7	-0,9	1,0

Pela Tabela 2 é possível observar que as maiores amplitudes de variação, tanto para o BHC quanto para as variáveis P e ETo, ocorreram nos meses de janeiro e dezembro, tendo em média para esses meses uma redução para o BHC de 13,3 e 10,2 mm; para a P uma média de redução de 11,7 e 9,0 mm; e uma média de aumento para a ETo de 2,1 e 1,0 mm respectivamente.

Para representar essas alterações ao longo dos anos, a ottobacia 44828, localizada no estado do Mato Grosso (Figura 4), que apresentou tendência nos meses de janeiro e julho no BHC, P e ETo, para o período de 2003 a 2019, tendo um período atípico de seca no ano de 2012, está representada graficamente na Figura 6.

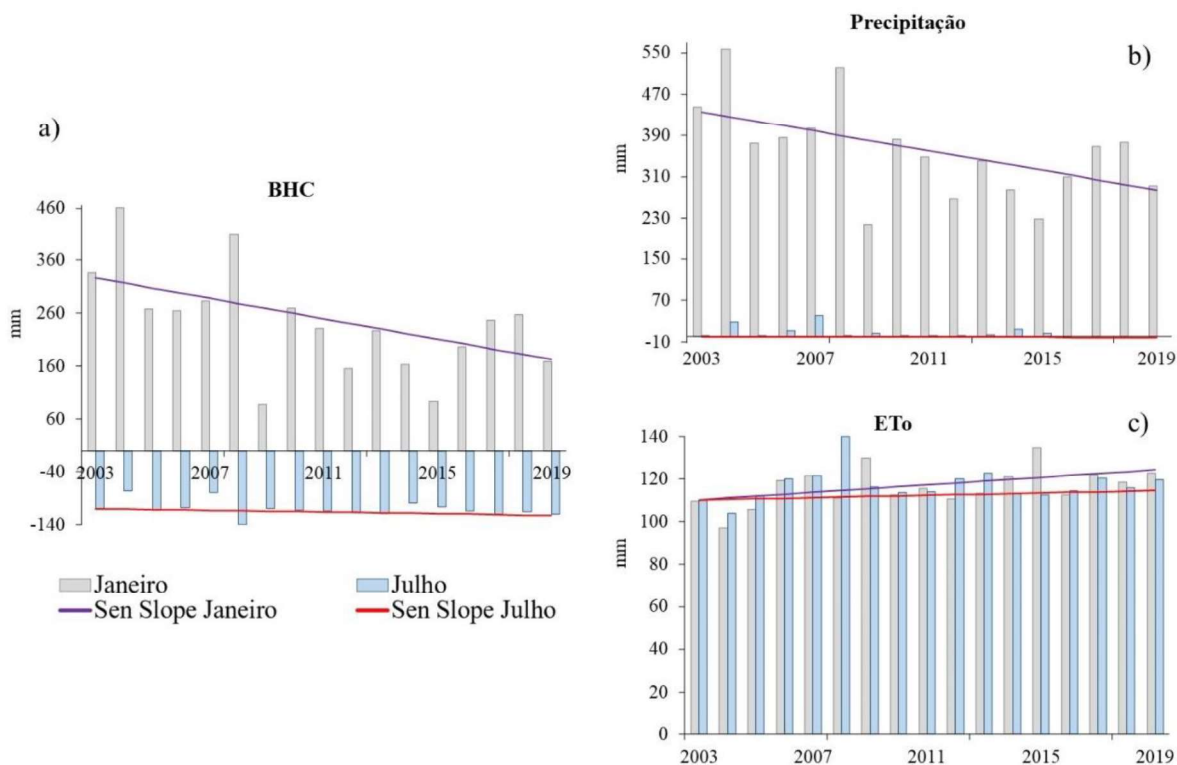


Figura 6 – Teste de Sen Slope para o balanço hídrico climatológico – BHC (a), precipitação (b) e evapotranspiração de referência – ETo (c) nos meses de janeiro e julho na ottobacia 44828 entre o período de 2003 a 2019.

Observa-se que a magnitude da tendência no mês de janeiro na ottobacia 44828 é mais expressivo do que no mês de julho (Figura 6). O BHC dessa ottobacia é de decréscimo tanto no mês de janeiro quanto no mês de julho, sendo estimado uma taxa de redução anual de 9,6 mm e 0,8 mm, respectivamente, ou seja, essa taxa de redução no BHC mensal totaliza no período de 2003 a 2019 163,4 mm para o mês de janeiro e de 13,6 mm em julho. A P também teve tendência de decréscimo nos meses de janeiro e julho, sendo estimada uma taxa de redução anual de 9,5 mm e 0,1 mm, respectivamente, ou seja, essa taxa de redução no total mensal da P totaliza no período de 2003 a 2019 161,2 mm para o mês de janeiro e de 2,1 mm em julho. Já a ETo observa-se tendência de acréscimo nos meses de janeiro e julho, sendo estimado taxa de aumento anual de 0,9 mm e 0,3 mm, respectivamente, ou seja, essa taxa de aumento no total mensal da ETo no período de 2003 a 2019 totaliza 14,9 mm no mês de janeiro e 4,7 mm em julho.

Assim como nos meses de janeiro e julho, os outros meses tiveram tendência significativa no BHC nas ottobacias do Cerrado e constatou-se que possivelmente essas tendências também estão diretamente relacionadas as tendências das variáveis de entrada do BHC, da P e da ETo, ou seja, existe uma correlação negativa não linear entre a P e ETo.

Em decorrência do uso e cobertura do solo no Cerrado, estudos mostraram uma redução no fluxo de calor latente acompanhado por um aumento no fluxo de calor sensível, resultando em temperaturas mais altas do ar e uma diminuição substancial na umidade e precipitação próximo à superfície (HOFMANN et al., 2021). Temperaturas mais elevadas implicam em aumento da evapotranspiração potencial, no entanto, caso não haja um aumento da precipitação para compensar, tem-se um aumento da deficiência hídrica (ASSAD et al., 2020). Segundo Siqueira et al. (2021), em estudo realizado em uma bacia do Cerrado, maiores taxas de evapotranspiração e menor precipitação resultam em menos água disponível para infiltração e escoamento. Com menor volume de água infiltrada, há menor recarga de lençol freático.

#### **3.4. Relação entre a variação do balanço hídrico climatológico (BHC) e a disponibilidade hídrica**

As mudanças climáticas na região do Cerrado são evidentes. As tendências observadas nas variáveis climáticas, com aumento da ETo e redução da P na maioria das otobacias, poderão resultar em alterações no regime hidrológico e, conseqüentemente, na disponibilidade hídrica e nos processos de alocação de água (FERREIRA et al., 2021b). As otobacias que apresentaram BHC negativo, ou seja, com déficit hídrico, são as regiões com maior risco de comprometimento da disponibilidade hídrica e de não ter água suficiente para atender às demandas.

O BHC com frequência de 80% apresentou, no período chuvoso, para as otobacias nas regiões do Cerrado Ocidental (área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia), Central e Sul, o BHC positivo, ou seja, com excedente hídrico, enquanto as otobacias ao Norte e Leste em todos os meses foi observado déficit hídrico.

Os resultados encontrados neste estudo, em relação ao BHC, corroboram os resultados obtidos por Althoff et al. (2021b), onde as otobacias localizadas na área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia possuem uma disponibilidade hídrica potencial notavelmente maior. Além dessa região, o Centro e Sul do Cerrado também apresentaram uma disponibilidade hídrica potencial consideravelmente maior. Já as otobacias localizadas na região Leste e Norte do Cerrado, apresentam menor disponibilidade hídrica potencial, uma vez que está situado em uma zona de transição para um clima semiárido.

Os meses de setembro e outubro são os meses em que as otobacias apresentam déficit hídrico, com grau de severidade mais acentuado. Esses meses são aqueles que possuem maiores ocorrências de alto risco de aumento da pressão sobre a disponibilidade hídrica de acordo com estudo realizado por Althoff et al. (2021b). O Cerrado possui maior aporte energético de agosto a dezembro e sua estação chuvosa geralmente começa em outubro e se estende até março ou

abril. Quando a estação seca dura até o final de outubro, a vazão nos rios continua a diminuir e a pressão sobre os recursos hídricos aumenta. Isso justifica setembro e outubro como os meses de maior risco na maior parte da região do Cerrado (ALTHOFF et al. 2021a).

O período em que o risco de aumento da pressão sobre a disponibilidade hídrica é maior, geralmente, é no início da estação chuvosa. Isso indica que as atividades agrícolas podem ser prejudicadas não apenas pela incerteza de distribuição (espaço-temporal) da precipitação, mas também pela diminuição da irrigação devido à menor disponibilidade dos cursos hídricos (ALTHOFF et al. 2021b).

No Cerrado, a expansão de áreas com agricultura irrigada ao longo dos anos se deu, em sua maioria, de forma acelerada (ALTHOFF et al., 2022; POUSA et al., 2019). Na Figura 7 está representado a irrigação por pivô central no Cerrado nos anos de 2005 e 2019.

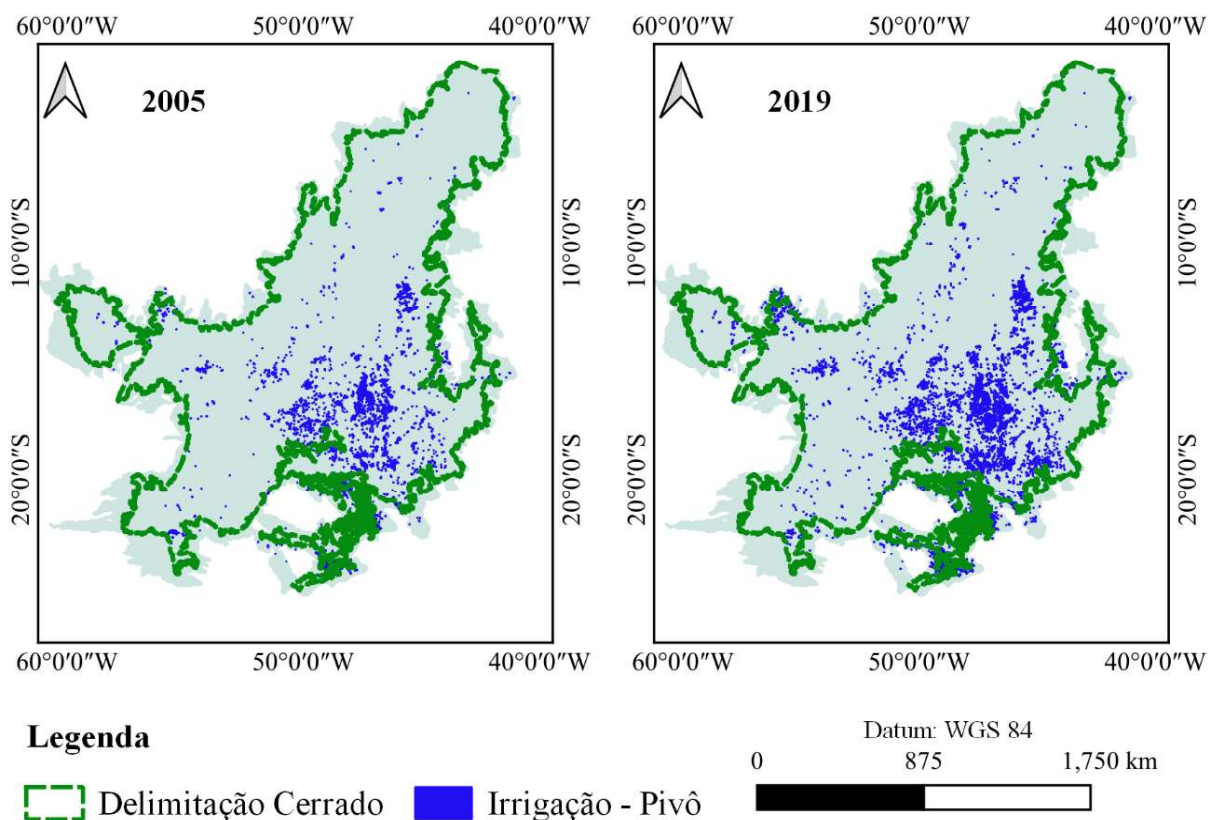


Figura 7 – Irrigação por pivô central no Cerrado nos anos de 2005 e 2019.

Observou-se um aumento da irrigação por pivô central nas áreas do Cerrado. Em 2005, o número de pivôs era por volta de 7.619, com uma área total irrigada de aproximadamente 581.253 hectares, passando para aproximadamente 19.088 pivôs em 2019, cobrindo uma área cerca de 1.291.330 hectares, tendo um incremento de 122% da área irrigada no bioma.

O maior número de pivôs se concentra, principalmente, nas regiões Centro-Sul do bioma Cerrado. Nessas regiões foram observadas tendências significativas tanto do BHC como na P e ETo mensais. Desta forma, o aumento da demanda hídrica pela irrigação pode ser um dos fatores de interferência nas tendências encontradas no presente estudo. Segundo Oliveira et al. (2014) em seu estudo no Cerrado brasileiro, constatou que as tendências nos componentes do balanço hídrico são em parte devido a mudanças no uso e cobertura do solo. Essas mudanças podem não apenas contribuir significativamente para o clima local, mas também afetar as regiões vizinhas (ARANTES et al., 2016; COSTA; PIRES, 2010; DEBORTOLI et al., 2016; HOFFMANN; JACKSON, 2000; LEE et al., 2011; SALAZAR et al., 2015; SPERA et al., 2016).

De acordo com Althoff et al. (2021b), essa alta concentração de pivôs centrais na região Centro-Sul do Cerrado pode ser parcialmente atribuída às condições favoráveis durante os períodos de cultivo. A maior precipitação durante os períodos em que o clima é propício ao desenvolvimento da cultura resulta em uma maior produtividade e lucratividade.

O estado que teve o maior percentual de incremento de área irrigada por pivô central dentro do bioma Cerrado foi o Tocantins com aumento de 306%, passando de 3.478 hectares em 2005, para 14.115 hectares em 2019. O Tocantins faz parte de uma região mais ampla chamada MATOPIBA, formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Essa região é uma fronteira agrícola no bioma Cerrado, que é caracterizada por rápidas mudanças na cobertura e uso do solo para cultivo, principalmente pela soja, algodão e milho (POUSA et al., 2019).

Entre os estados formados pelo MATOPIBA, a Bahia é a que possui maior área irrigada, com destaque para a região Oeste da Bahia situada no bioma Cerrado. Essa região teve um incremento percentual na área irrigada de 147%, sendo que em 2005 eram irrigados 72.055 hectares (702 pivôs) e em 2019 aumentou para 177.555 hectares (1.598 pivôs). De acordo com Pousa et al. (2019), o Oeste da Bahia é uma das fronteiras agrícolas mais ativas do mundo, no entanto, nos últimos anos os conflitos hídricos têm aumentado na região, uma vez que ocorrem redução da disponibilidade hídrica e aumento da demanda pelo recurso.

Além do Oeste da Bahia, outras regiões do Cerrado apresentaram o BHC em déficit hídrico em todos os meses ou pelo ao menos nos meses de estiagem (Figura 3). Diante dos resultados encontrados nas tendências BHC, P e ETo mensais, se estes forem mantidos, os conflitos pelo uso da água podem se tornar cada vez mais frequentes nos próximos anos.

Sendo assim em termos de adaptação, é necessário que se tenham estratégias que incentivem a diversificação da produção para aumentar a resiliência dos agroecossistemas; transferência de tecnologia, especialmente tecnologias que combinam mitigação e adaptação; e

produção ecologicamente sustentável e eficiente para garantir a melhoria da viabilidade da agricultura e da segurança alimentar (MILHORANCE et al., 2018).

De acordo com Alizadeh e Mousavi (2013) uma técnica que pode ser utilizada de forma eficiente em relação ao manejo de irrigação, é a irrigação deficitária, na qual a irrigação ocorre durante os estádios de crescimento que a cultura é sensível ao déficit hídrico e limitando nos demais estádio fenológicos. Segundo Evans e Sadler (2008) a irrigação deficitária deve ser uma estratégia gerenciada cuidadosamente, sendo apoiada por sistemas avançados de irrigação com sistemas flexíveis e tecnificados.

#### **4. Conclusões**

O Cerrado apresenta grande variabilidade na precipitação anual e evapotranspiração em todo o seu território. As otobacias na área de transição do Cerrado com o bioma Amazônia, em geral, possuem meses com excedente hídrico, já as otobacias ao Leste e Nordeste do Cerrado, área de transição com a Caatinga, possuem déficit hídrico em todos os meses, sendo o grau de severidade mais acentuado nos meses de estiagem, de maio a outubro.

Constatou-se que para o período de 2003 a 2019, tendo um período atípico de seca no ano de 2012, apresentaram tendências significativas no balanço hídrico climatológico em diferentes meses. Essas tendências foram em geral de redução, estando relacionadas às tendências de redução da precipitação e/ou aumento da evapotranspiração de referência, variáveis utilizadas na estimativa do balanço hídrico climatológico.

As tendências observadas nas variáveis climáticas para o Cerrado podem levar a mudanças nas condições hidrológicas, como diminuição da vazão e mudança nos períodos de disponibilidade hídrica. Essas mudanças colocam em risco a segurança hídrica e podem interferir nos processos de alocação de água, podendo comprometer o desenvolvimento da região.

## 2.3 Artigo 3

### **Índice de viabilidade para produção de culturas agrícolas anuais**

**Resumo:** Num cenário em que os desafios associados à produção sustentável de alimentos se intensificam, é de extrema importância que o crescimento da agricultura seja bem planejado e ordenado, de forma a reduzir tanto os impactos do clima na produção, como a demanda por água azul. Nesse sentido, é fundamental que se tenha ferramentas que possam subsidiar os tomadores de decisão, indicando regiões mais aptas ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro e irrigada, as melhores épocas de plantio, variedades e rotações de culturas. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um índice de viabilidade para produção de culturas agrícolas anuais (IVP) que possa ser utilizado por tomadores de decisão para analisar, em uma região, as áreas mais aptas ao desenvolvimento de culturas anuais, tanto de sequeiro como irrigada. O IVP foi desenvolvido para subsidiar o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à produção sustentável de alimento. Esse índice combina indicadores relacionados à planta, clima, solo e disponibilidade hídrica. O seu valor varia de zero a um, quanto mais próximo da unidade, maior a viabilidade de se produzir uma determinada cultura, ou rotação de culturas em uma área. O IVP foi aplicado à região do Cerrado para a cultura da soja. A análise dos resultados indicou que a soja, plantada em 15 de setembro foi mais viável nas regiões Central, Leste, Sudeste, Sudoeste e Oeste, enquanto que a soja plantada em 15 de outubro é mais viável nas regiões Noroeste, Norte e Nordeste do bioma.

**Palavras-chave:** Recursos hídricos, Agricultura irrigada, Agricultura de sequeiro, Aptidão agrícola.

## 1. Introdução

A produção mundial de alimentos precisará aumentar em aproximadamente 60% para atender a demanda projetada para o ano de 2050 (UNESCO, 2021). O desafio é aumentar a produção de forma sustentável, compatibilizando aspectos ambientais, econômicos e sociais (FAO, 2017; MASSRUHÁ et al., 2020).

O clima é o fator que tem mais influência na produção agrícola. A sua incerteza, especialmente das chuvas, principal fonte de água para as culturas, compromete a estabilidade da produção de alimento, principalmente na agricultura de sequeiro, e coloca em risco a segurança hídrica de bacias hidrográficas (ALTIERI; NICHOLLS, 2017; CINTRA et al., 2020; MALDANER et al., 2014).

No Brasil, principal produtor e exportador de diversas commodities agrícolas, tem-se observado a redução da produção agrícola em vários locais em virtude da redução e/ou má distribuição das chuvas, principalmente na região do Cerrado (SILVA et al., 2023), que responde por cerca de 45% da área agrícola nacional (BOLFE et al., 2020).

Estima-se através de estudos relacionados às projeções climáticas no Cerrado que são esperados aumentos na temperatura, prolongamento da estação seca e redução na disponibilidade hídrica, o que pode comprometer a agricultura na região, especialmente a agricultura de sequeiro (CHOU et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2017; PIRES et al., 2016). Essas projeções têm implicações ainda mais significativas para áreas já sujeitas a conflitos relacionados ao uso e alocação de água (POUSA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2014).

É imprescindível desenvolver resiliência diante das mudanças climáticas e mitigar os conflitos pelo uso da água. Entre as alternativas destacadas, inclui-se a intensificação de práticas agrícolas em áreas já cultivadas, como pastagens degradadas (SPERA, 2017), bem como aprimorar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos locais com base em informações hidrológicas básicas e confiáveis (POUSA et al., 2019).

No contexto da intensificação, a irrigação se apresenta como uma das estratégias com maior potencial para aumentar a produção em uma mesma área, reduzindo os efeitos negativos do clima. Por outro lado, o crescimento da irrigação, maior usuária de recursos hídricos no Brasil, tem que ser bem coordenado para não intensificar os conflitos pelo uso da água, principalmente naquelas regiões que já se encontram com baixa disponibilidade hídrica. O principal desafio nessas regiões está em conciliar a expansão da irrigação, visando a estabilidade na produção de alimentos, com a disponibilidade de recursos hídricos (RODRIGUES, 2017). No Cerrado, é cada vez mais importante produzir mais com uma menor quantidade de água (RODRIGUES et al., 2023).

O desenvolvimento de várias regiões está pautado na sua capacidade de desenvolver a agricultura de forma sustentável (ALTIERI; NICHOLLS, 2017). A previsão é que a área irrigada no Brasil aumentará em 3,64 milhões de hectares, até o ano de 2030 (ANA, 2017). Cerca de 64% da área irrigada no Brasil está na região do Cerrado (BRASIL, 2014).

Essa região, onde a agricultura é a base da economia, já apresenta várias áreas em situação de estresse hídrico e com diferenças sociais devido às diferentes oportunidades de acesso a água. O crescimento da agricultura no Cerrado deve ser muito bem planejado, priorizando culturas mais aptas, datas de plantios mais adequadas, rotações de cultura mais sustentáveis e evitando regiões com baixa disponibilidade hídrica. O crescimento desorganizado compromete a segurança hídrica e alimentar, piorando a qualidade de vida das pessoas.

Identificar, em grandes regiões, como a do Cerrado, áreas mais aptas a se produzir, tanto em condições de sequeiro como irrigada, é estratégico para o estabelecimento de políticas públicas que visem o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida das

pessoas. Essa identificação de regiões mais aptas a se produzir é parte crucial de um planejamento estratégico, cujo desenvolvimento tem sido dificultado pela falta de entendimento da complexa interação existente entre clima, solo e planta. A dificuldade no planejamento é aumentada pela falta de dados hidroclimáticos, nas escalas espacial e temporal adequadas. Essa situação tem contribuído para aumentar os conflitos pelo uso da água e comprometido o desenvolvimento da região.

Essa situação, oportuniza o uso de ferramentas de planejamento, como os indicadores de sustentabilidade. Em relação à disponibilidade hídrica, vários indicadores de sustentabilidade foram desenvolvidos (LIU et al., 2017). De acordo com Damkjaer e Taylor (2017), a quantificação formal começou no início dos anos de 1980, com o desenvolvimento do Índice de Estresse Hídrico (WSI), vinculado explicitamente a segurança alimentar e a disponibilidade de água doce (FALKENMARK, 1986, 1989).

Falkenmark et al. (1989) e Falkenmark et al. (2009) desenvolveram um indicador com a finalidade de medir a escassez de água, sendo este obtido pelo número de pessoas que vivem dentro de um determinado local pelo volume de água disponível nesse local. A proporção de uso da água pela disponibilidade (WTA), ou proporção de criticidade, é outro indicador amplamente usado para avaliar a escassez de água. Nas últimas décadas, tem-se desenvolvido modelos de disponibilidade e uso da água espacialmente em escala global com alta resolução espacial. Onde o uso da água pode referir-se ao consumo ou à retirada de água (FALKENMARK, 1997; VÖRÖSMARTY et al., 2000; ALCAMO; HENRICHS, 2002; OKI; KANAE, 2006; LIU et al., 2017). Outro indicador é o SDG 6.4.2 que é um indicador azul de estresse hídrico, que é definido como a razão entre o total de água doce retirada por todos os setores e a disponibilidade de água (VANHAM, et al., 2018).

Outros indicadores foram desenvolvidos para avaliar o status da escassez de água, Indicador IWMI (SECKLER, 1998); Índice de pobreza na água (SULLIVAN, 2002; SULLIVAN et al., 2003); Escassez de Água Verde-Azul (ROCKSTRÖM et al., 2009; GERTEN et al., 2011); Avaliação baseada na pegada hídrica (HOEKSTRA et al., 2011); Abstração cumulativa em relação à demanda (HANASAKI et al., 2008); LCA (FRISCHKNECHT et al., 2009; PFISTER et al., 2009), Indicador de quantidade, qualidade e fluxo ambiental (QQE) (ZENG et al., 2013; LIU et al., 2016).

No Brasil, o zoneamento agrícola de risco climático (BRASIL, 2023) tem sido utilizado oficialmente para fins de crédito agrícola. Essa abordagem tem como finalidade a redução dos riscos associados a eventos climáticos adversos, indicando nos municípios os períodos mais

adequados para o cultivo de diferentes culturas, levando em consideração as variações de solo e os ciclos de cultivo.

O zoneamento de risco não permite, entretanto, uma avaliação comparativa da aptidão produtiva de áreas dentro de uma região, reduzindo a oportunidade de desenvolvimento de áreas com menor aptidão. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um índice de viabilidade para produção de culturas anuais, com base em informações sobre planta, solo, clima e disponibilidade hídrica, e avaliar a aplicação desse índice na região do Cerrado brasileiro, identificando áreas de maior ou menor aptidão no desenvolvimento das culturas anuais.

## 2. Material e Métodos

O índice de viabilidade para produção de culturas anuais (IVP) foi desenvolvido para subsidiar políticas públicas que contribuem para o crescimento sustentável da agricultura de sequeiro e irrigada. O IVP indica áreas, dentro de regiões, que sejam mais viáveis à produção de culturas agrícolas anuais, com foco na demanda e na oferta hídrica. O seu valor varia de zero a um, quanto mais próximo da unidade, maior a viabilidade de se produzir uma determinada cultura, ou rotação de culturas naquela área. O IVP pode ser utilizado para comparar aptidões entre áreas de uma região, considerando diferentes datas de plantio e rotações de cultura.

O IVP, Equação 1, foi elaborado para integrar, em um único índice, as aptidões de uma área, por exemplo, uma bacia hidrográfica, para o desenvolvimento da agricultura. Esse índice representa a média aritmética das aptidões ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro e irrigada.

$$IVP = \frac{IADAI + IADAS}{2} \quad (1)$$

em que:

IADAI = Indicador de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada; e

IADAS = Indicador de aptidão ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro.

Alguns indicadores que compõe o IADAI e o IADAS, que serão descritos na sequência, variam temporalmente, ou seja, variam de ano para ano em função das combinações de vários fatores, como, por exemplo, clima e planta. Para esses indicadores, o valor utilizado para

compor o IVP final foi obtido a partir de curvas de frequência de ocorrência, utilizando como referência o valor referente à frequência de 20% (F20%) de ser igualado ou superado.

### 2.1. Indicador de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI)

O IADAI representa a aptidão de uma área, em uma região, ao desenvolvimento da agricultura irrigada. O valor do IADAI varia de zero a um, quanto mais próximo de um, maior a aptidão da área à agricultura irrigada. O IADAI (Equação 2) é uma média ponderada dos valores dos indicadores que representam a influência do solo (IS), da planta (IP), do clima (IC), da disponibilidade de água verde na área irrigada (IAV<sub>i</sub>) e da disponibilidade hídrica (IAA). No cálculo do IADAI, o IAA tem peso dois, por representar a quantidade de água azul disponível ao desenvolvimento da agricultura irrigada.

$$IADA_i = \frac{IS + IP + IC_{IN} + IAV_i + IAA \times 2}{6} \quad (2)$$

### 2.2. Indicador de aptidão ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro (IADAs)

O IADAs representa a aptidão de uma área, em uma região, ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro. O valor do IADAs varia de zero a um, quanto mais próximo de um, maior a aptidão da região a agricultura de sequeiro. O IADAs (Equação 3) é uma média ponderada dos valores dos indicadores que representam a influência do solo (IS), da planta (IP), do clima (IC), da água verde no sequeiro (IAV<sub>s</sub>) e do déficit hídrico acumulado (IDH). No cálculo do IADAs, o IDH tem peso dois, por representar o efeito acumulado do déficit hídrico na produção.

$$IADA_s = \frac{IS + IP + IC_{IN} + IAV_s + IDH \times 2}{6} \quad (3)$$

### 2.3. Indicador representativo da influência do solo na produção

O indicador representativo da influência do solo na produção (IS) é calculado pela relação entre a água disponível na área de interesse ( $AD_i$ ) e a água disponível máxima ( $AD_{máx}$ ), obtida considerando toda as áreas de interesse na região, Equação 4. O valor de IS varia de zero a um.

É interessante observar que o valor de IS é o mesmo, tanto para a cultura de sequeiro quanto para a irrigada. Além disso, o valor de IS, para uma mesma área, não varia temporalmente. Valores de IS mais próximos de um indicam que a área tem maior capacidade de retenção de água, em relação a áreas com menores valores de IS, e, conseqüentemente, são mais aptas para produção.

$$IS = \frac{AD_i}{AD_{máx}} \quad (4)$$

### 2.4. Indicador representativo da influência do clima na produção

O indicador representativo da influência do clima na produção (IC) varia temporalmente em uma mesma área. Isto é, uma mesma área, em anos diferentes, o IC pode apresentar valores diferentes. Este indicador, Equação 5, é calculado pela razão entre a precipitação total ( $P_{TC}$ ) e a evapotranspiração de referência total ( $ET_{oTC}$ ), ocorridas durante o ciclo da cultura.

Para evitar valores maiores que a unidade, o valor de IC foi normalizado ( $IC_{iN}$ ), Equação 6. A normalização foi feita fazendo-se a relação entre o  $IC_i$  obtido em uma área de interesse, com o  $IC_{imáx}$ , obtido considerando toda a região de interesse. Quanto mais próximo de um for o valor de  $IC_{iN}$ , maior a aptidão da área para produzir tanto na agricultura irrigada, como na de sequeiro. O  $IC_{iN}$  varia espacialmente e temporalmente e o mesmo valor de IC é utilizado tanto para análise da cultura de sequeiro quando da cultura irrigada.

$$IC_i = \frac{P_{TC}}{ET_{oTC}} \quad (5)$$

$$IC_{iN} = \frac{IC_i}{IC_{MÁX}} \quad (6)$$

## 2.5. Indicador representativo da influência da Planta na produção

Este indicador representa a média ponderada de três parâmetros que representam condições da planta (IP). O fator de resposta da produção da cultura ao estresse hídrico (Ky) foi escolhido para representar a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico, ou seja, sua resistência ao estresse hídrico. Quanto menor o valor deste parâmetro, maior a resistência da planta ao estresse hídrico. A profundidade máxima do sistema radicular da cultura (Raiz<sub>max</sub>) foi utilizada para representar a capacidade da planta em explorar maiores volumes do solo e assim serem mais resistentes à períodos de escassez hídrica. Quanto maior este parâmetro, maior a resistência da planta ao estresse hídrico. O maior valor do coeficiente de cultura, que ocorre na fase intermediária ou de produção (K<sub>CMS</sub> - Midseason), como indicador da demanda hídrica, foi o terceiro parâmetro a compor este indicador. Quanto menor o valor deste parâmetro, menor o uso da água pela cultura.

Este indicador é calculado pela Equação 7, comparando-se os parâmetros da cultura de interesse com o valor máximo ou mínimo dos parâmetros de culturas previamente cadastradas em um banco de dados, que representam as principais culturas cultivadas na região. Para o Cerrado, as seguintes culturas anuais foram cadastradas no banco de dados: soja, milho, feijão, algodão, trigo e sorgo.

Como este indicador é calculado de forma comparativa com as culturas que compõem o banco de dados, o seu valor é constante no espaço e no tempo e só irá variar se forem acrescentadas novas culturas no banco de dados que impactem nos valores máximos ou mínimos dos parâmetros que compõem o indicador.

$$IP = \frac{\frac{Ky_{min}}{Ky_x} + \frac{Raiz_x}{Raiz_{max}} * 2 + \frac{K_{CMSmin}}{K_{CMSx}}}{4} \quad (7)$$

em que:

$K_{y_{\min}}$  = menor valor, entre as culturas cadastradas no banco de dados, do fator de resposta da produção ao estresse hídrico, adimensional;

$K_{y_x}$  = fator de resposta da produção ao estresse hídrico da cultura de interesse, adimensional;

$Raiz_x$  = comprimento máximo do sistema radicular da cultura de interesse, L;

$Raiz_{\max}$  = maior comprimento máximo do sistema radicular entre as culturas cadastradas no banco de dados, L;

$K_{CMS_{\min}} - \text{Midseason}$  = menor valor, entre as culturas cadastradas no banco de dados, do coeficiente de cultura na fase intermediária; e

$K_{CMS_x} - \text{Midseason}$  = coeficiente de cultura na fase intermediária da cultura de interesse.

## **2.6. Indicador representativo da influência da disponibilidade de água verde na produção**

Este indicador é calculado em função da disponibilidade de água verde e da demanda hídrica total da cultura ( $DH_{TC}$ ). A disponibilidade de água verde, ou chuva efetiva, representa a quantidade de umidade no solo, proveniente da chuva, disponível para sustentar o crescimento da planta (VEETIL; MISHRA, 2018). Quanto mais próximo a quantidade de água verde disponível for da  $DH_{TC}$ , maior é a aptidão da região para produzir em condições de sequeiro e, no caso da agricultura irrigada, menor é a quantidade de água azul que será utilizada na irrigação.

O Indicador de Água Verde (IAV) é calculado pela razão entre a chuva efetiva na área irrigada ( $CE_I$ ) ou no sequeiro ( $CE_S$ ) e a  $DH_{TC}$ , Equações 8 e 9, respectivamente. Os valores de  $CE_I$ ,  $CE_S$  e  $DH_{TC}$  foram calculados fazendo-se o balanço de água no solo em cada região, considerando, entre outras coisas, a data de plantio e o ciclo da cultura.

A chuva efetiva tende a ser maior na área de sequeiro. O valor do IAV varia de zero a um, quanto mais próximo da unidade, maior a umidade disponível para o desenvolvimento das culturas, no caso de sequeiro, e menor a quantidade de água azul a ser utilizada, no caso da irrigação.

$$IAV_I = \frac{CE_I}{DH_{TC}} \quad (8)$$

$$IAV_S = \frac{CE_S}{DH_{TC}} \quad (9)$$

## 2.7. Indicador representativo da influência da disponibilidade de água azul no desenvolvimento da agricultura irrigada

Este indicador é calculado pela razão entre a disponibilidade de água superficial (água azul), disponível para ser outorgada, representada pela Q95, e a demanda de irrigação (DI). A Q95 é um indicador que representa a vazão mínima com 95% de permanência no tempo. Esse indicador representa o potencial de crescimento da irrigação na área de interesse. O Indicador de Água Azul (IAA) é calculado, em cada área, pela Equação 10, que representa a relação entre a Q95<sub>i</sub>, da área de interesse, pela DI.

$$IAA_i = \frac{Q95_i}{DI_i} \quad (10)$$

Para evitar valores maiores que a unidade, o valor de IAA foi normalizado (IAA<sub>iN</sub>), Equação 11. A normalização foi feita fazendo-se a relação entre o IAA<sub>i</sub> obtido em uma área de interesse, com o IAA<sub>imáx</sub>, obtido considerando toda a região de interesse. Valores de IAA<sub>iN</sub> mais próximo de um indicam áreas com maior potencial de crescimento da irrigação. O IAA<sub>iN</sub> varia espacialmente e temporalmente. A variação temporal observada no IAA<sub>iN</sub> ocorre devido à variação da demanda de irrigação, que é calculada por meio do balanço de água no solo.

$$IAA_{iN} = \frac{IAA_i}{IAA_{MÁX}} \quad (11)$$

## 2.8. Indicador representativo da influência do déficit hídrico na produção das áreas de sequeiro

O indicador representativo da influência do déficit hídrico na produção das áreas de sequeiro (IDH) foi inserido como um indicador do IADAs para representar o impacto na produção advindo de déficits hídricos acumulados (DHC) durante o ciclo da cultura. O DHC é o somatório dos DHCs ocorridos ao longo do ciclo da cultura. O DHC ocorre sempre que o déficit de água no solo for maior que um valor de referência (DHP). O valor de DHP a ser utilizado dependerá da cultura em questão, Figura 1. Por exemplo, no caso da soja, foi utilizado um DHP igual a 50% da água total disponível no solo.

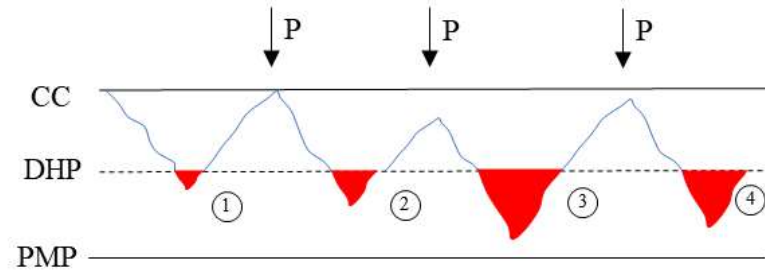


Figura 1 – Esquema representativo da capacidade de campo (CC), déficit hídrico permitido no manejo de irrigação (DHP), ponto de murcha permanente (PMP) e chuva (P), no perfil do solo. As áreas em cor vermelha representam os déficits hídricos ocorridos.

O valor de IDH varia de zero a um, quanto mais próximo da unidade, menor a lâmina acumulada de déficit e maior a aptidão a agricultura de sequeiro na área de interesse. Este indicador varia temporalmente e espacialmente.

$$\text{IDH} = \frac{\text{DHC}_{\min}}{\text{DHC}_i} \quad (12)$$

## 2.9. Cerrado

O Bioma Cerrado (Figura 2) é fundamental para a agricultura brasileira e para o equilíbrio hidrológico nacional, desempenhando um papel essencial ao influenciar as vazões dos rios em oito das doze regiões hidrográficas do país. (ALTHOFF; RODRIGUES, 2023). Essa região, com área de aproximadamente 204 milhões de hectares, ocupando cerca de 24% do território brasileiro, cobre total ou parcialmente 13 estados (MAPBIOMAS, 2020).

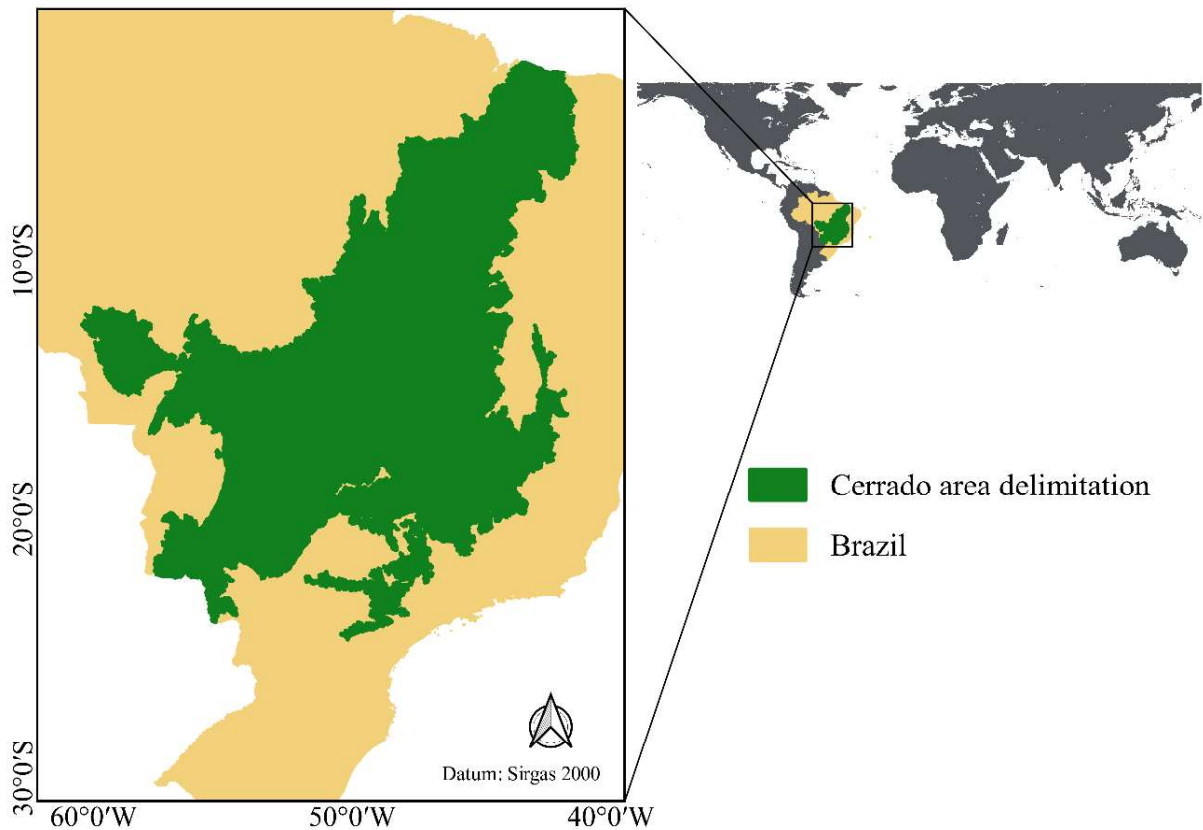


Figura 2 –Bioma Cerrado no contexto do Brasil e do mundo.

As principais culturas anuais cultivadas no Cerrado no ano de 2019, com maior percentual de área plantada foram a soja (49,5%); milho (24,6%); cana-de-açúcar (15,2%); algodão herbáceo (3,8%); feijão (2,1%); sorgo (1,9%), arroz (0,8%) e trigo (0,7%) (FARIAS; RODRIGUES, 2023).

O clima do Cerrado é classificado predominantemente como tropical de Savana (Aw), de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013). Essa classificação é caracterizada por ter duas estações bem definidas, sendo uma estação seca, que normalmente ocorre de maio a setembro, com chuvas inferiores a 60 mm no mês mais seco, e uma estação chuvosa, que normalmente ocorre de outubro a abril, a qual é responsável por aproximadamente 90% do total de chuva anual (KLINK, 2014; ALTHOFF et al., 2023).

Entre 2003 e 2019, a média da precipitação total anual no Cerrado variou de 700 a 2.063 mm, aumentando de Leste a Oeste e do Norte ao Sul, com média de 1.471 mm. E a média da Evapotranspiração total anual variou de 1.060 a 1.903 mm, aumentando de Oeste a Leste e do Sul ao Norte, com média de 1.563 mm (FERREIRA et al., 2023).

As duas classes de solo predominante do bioma Cerrado são: os Latossolos, ocupando cerca de 43% da área total do bioma; e os Neossolos, ocupando aproximadamente 22% da área.

Os Latossolos são altamente intemperizados, ácidos, com baixa concentração de matéria orgânica e de nutrientes, e alta concentração de ferro e alumínio, são solos profundos e bem drenados com declives suaves. Já os Neossolos são divididos em três subclasses, sendo os Neossolos Quartzarênicos mais comum, sendo profundos, de textura arenosa e bem drenados, ocorrendo em áreas planas ou suave-onduladas (SANO et al., 2019; SANTANA; RODRIGUES, 2023).

As regiões com maiores potenciais de disponibilidade hídrica estão localizadas nas regiões Oeste e Sul do bioma, regiões essas de transição com o clima tropical e clima temperado, respectivamente, e a menor disponibilidade hídrica é verificada no Leste e Nordeste do bioma, regiões de transição com o clima semiárido brasileiro.

## **2.10. Base de dados utilizada**

Os dados utilizados neste estudo foram em formato raster, totalizando 20.592 pixels na área do bioma. Os dados são gradeados em resolução espacial de  $0,1^\circ$  ( $\sim 100 \text{ km}^2$ ). No cálculo do balanço de água no solo, cada pixel é considerado uma área dentro da região do Cerrado.

### **2.10.1. Clima**

Os dados de precipitação e de evapotranspiração de referência foram obtidos do banco de dados HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022), para o período de janeiro de 2003 a dezembro de 2019. No HydroCerrado, os dados de precipitação diária foram obtidos do Integrated Multi-Satellite Retrievals, para a missão de Global Precipitation Measurement (GPM) (IMERG), (HUFFMAN et al., 2019a; 2019b); e os dados de evapotranspiração de referência diária do ETo-Brazil (ALTHOFF et al.; 2020). Os dados estão disponíveis em: <https://github.com/danielalthoff/HydroCerrado/>.

### **2.10.2. Água disponível nos solos**

Os dados referentes a água disponível dos solos (AD) foram obtidos do banco de dados da Embrapa Solos (EMBRAPA, 2021), disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/3019/download>, nos quais foram reunidas informações de 1.500 perfis de solos, com dados de conteúdo de água na capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Sendo assim, para cada perfil de solo foi calculado a AD expressa em  $\text{mm.cm}^{-1}$ .

### **2.10.3. Vazão**

Os dados referentes à vazão diária foram obtidos do HydroCerrado (ALTHOFF et al., 2022), disponíveis em <https://github.com/danielalthoff/HydroCerrado/>. Os dados foram disponibilizados em base diária para as 4.518 ottobacias (nível 5) do Cerrado. As delimitações das ottobacias são provenientes da codificação oficial das bacias brasileiras, utilizando o método

de Otto Pfasterter (ANA, 2014). Com base nesses dados de vazão, calculou-se a Q95, que é a vazão mínima de referência utilizada para alocação de água em rios Federais no Brasil.

#### **2.10.4. Estimativa do IVP para avaliação da aptidão de áreas, na região do Cerrado, ao plantio da cultura da soja**

Para obtenção do IVP para o bioma Cerrado, foram calculados os indicadores IS, IC<sub>IN</sub>, IP, IAV<sub>i</sub>, IAV<sub>s</sub>, IAA e IDH. Para isto, foi desenvolvido uma rotina em Python, denominada MSEI\_IVP, no Modelo de Simulação de Estratégias de Irrigação (MSEI) (RODRIGUES; MOREIRA, 2015).

O IVP foi estimado para a cultura da soja, considerando três datas de plantio (15 de setembro, 15 de outubro e 15 de novembro). Na Tabela 1 apresenta-se os parâmetros principais da cultura da soja utilizados na simulação.

Tabela 1 – Parâmetros da cultura da soja utilizados na simulação

Características da Soja ( <i>Glycine max</i> (L) Merrill)	
Duração do ciclo vegetativo	110 dias
Ky	0,85
Profundidade máxima do sistema radicular	80 cm
K <sub>CMS</sub> - Midseason	1,20

Ky - Fator de resposta da produção da cultura ao estresse hídrico

K<sub>CMS</sub> - Midseason - Coeficiente de cultura, que ocorre na fase intermediária ou de produção

Além de avaliar a aptidão agrícola das áreas no Cerrado em relação a cada data de plantio, foi avaliada a melhor data de plantio em cada área.

#### **2.10.5. Identificação de regiões homogêneas**

Com o intuito de identificar as regiões homogêneas em termos de aptidão agrícola no bioma Cerrado, foi realizada análise de cluster utilizando o algoritmo de agrupamento K-Means, que consiste em dividir um conjunto de dados em grupos (clusters) distintos baseados em características similares. O valor de K (número ideal de clusters) foi previamente estabelecido por meio da metodologia do "ponto de cotovelo" (Elbow method) (VARELLA; QUADRELLI, 2017).

### 3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos foram divididos em três tópicos. No primeiro tópico, é apresentado o resultado do IVP para soja plantada no dia 15 de setembro; no segundo, é apresentado os diversos indicadores que compõe o IVP e no terceiro, é feita uma avaliação comparativa entre os plantios realizados nos dias 15 de setembro, 15 de outubro e 15 de novembro.

#### 3.1. Índice de viabilidade para produção da cultura da soja, plantada no dia 15 de setembro, para a região do Cerrado

Nas Figuras 3a e 3b apresentam-se os indicadores de aptidão de áreas do Cerrado ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI) e da agricultura de sequeiro (IADAS), e na Figura 3c apresenta-se o índice de viabilidade para produção da cultura da soja, plantada no dia 15 de setembro. Os mapas apresentados se referem a valores de indicadores e índice com F20% de ser igualado ou superado. É importante chamar a atenção que o IADAI não pode ser comparado com o IADAS. Os indicadores servem para avaliar áreas comparativamente dentro de uma região.

Na região do Cerrado, foram simulados o plantio da soja em um total de 20.592 áreas. Em cada área, avaliou-se o plantio da soja de 2003 a 2019, ou seja 16 ciclos. Ao todo foram realizadas 329.472 simulações.

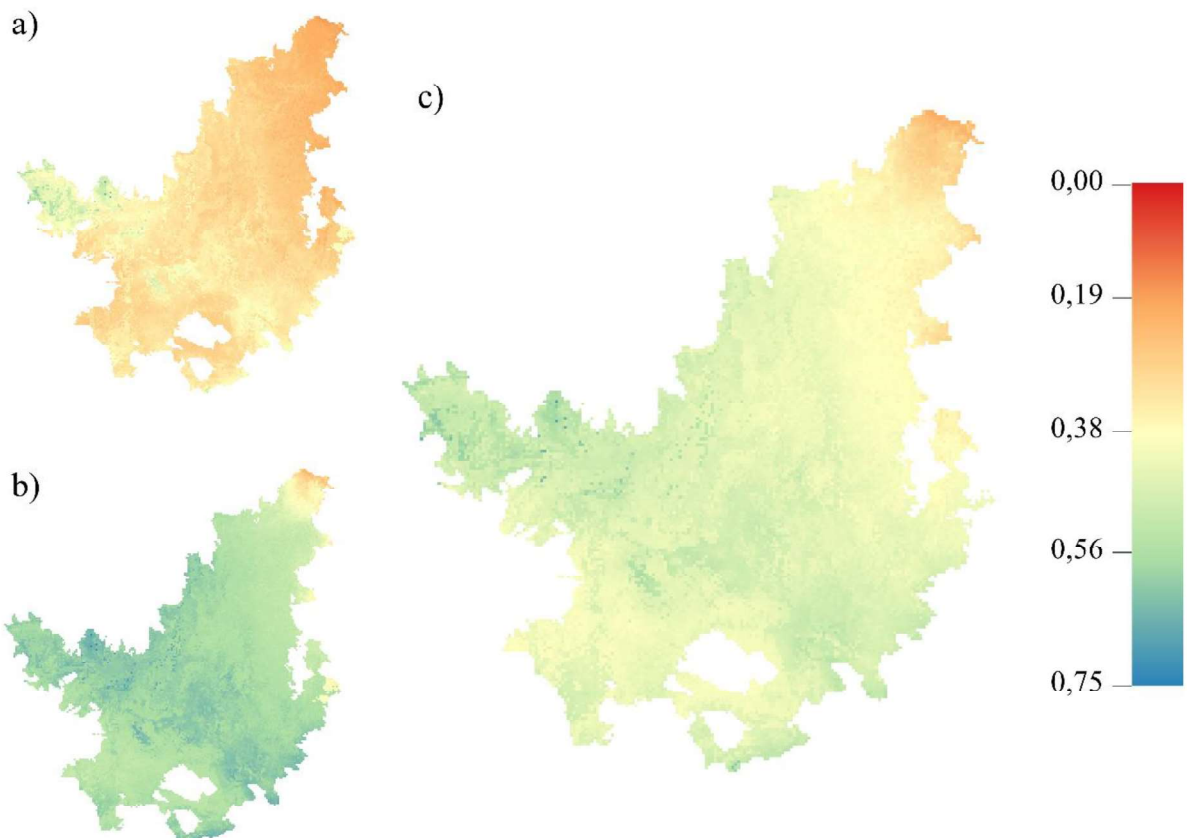


Figura 3 – Indicadores de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (a), de sequeiro (b) e do índice de viabilidade de produção da cultura da soja (c) para o Cerrado.

Para a região do Cerrado, os maiores valores observados de  $IADAI$ ,  $IADAS$  e  $IVP$  foram iguais a 0,679, 0,738 e 0,688, respectivamente. Essas áreas estão localizadas nos municípios de Lucas do Rio Verde, Sorriso e Lucas do Rio Verde, no estado do Mato Grosso, respectivamente. Isto é, essas são as áreas mais aptas a se plantar soja irrigada e de sequeiro, plantada em 15 de setembro, no Cerrado. Por outro lado, os menores valores observados de  $IADAI$ ,  $IADAS$  e  $IVP$  foram iguais a 0,169, 0,211 e 0,190, respectivamente. Essas áreas estão localizadas nos municípios de Buriti dos Lopes, Barreirinhas e Santo Amaro do Maranhão, estados do Piauí, Maranhão e Maranhão, respectivamente.

Analisando a Figura 3, observa-se que os maiores valores, que representam maior aptidão quanto ao desenvolvimento da agricultura irrigada, estão localizadas ao Oeste, porção Central e Sudeste do bioma, quando comparado com os menores valores, que estão na região Sudoeste, Leste, Norte e Nordeste do Cerrado. Por exemplo, uma área ao Sudeste do bioma, localizada no município de Tapira, no estado de Minas Gerais, apresenta valor de  $IADAI$  igual a 0,427, mostrando maior aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada, para a soja plantada em 15 de setembro, quando comparada com uma área na região Nordeste localizada no município de Porto Alegre do Piauí, no estado do Piauí, com valor de  $IADAI$  igual a 0,209. É importante ressaltar, entretanto, que este resultado não indica que não se pode plantar soja em Porto Alegre do Piauí. A interpretação deve ser feita no sentido de que Tapira é mais apta ao plantio da soja plantada em 15 de setembro. A diferença observada é atribuída principalmente ao indicador de  $IAVI$ , que apresentou maior valor no município de Tapira. Esse maior valor do  $IAVI$  é devido principalmente à relação entre a chuva efetiva e a demanda hídrica total da cultura ser um valor mais alto nessa área.

Avaliando o mapa representativo do  $IADAS$ , observa-se que algumas áreas localizadas no Norte e Nordeste da região do Cerrado apresentam valores de  $IADAS$  próximos a zero. Esse fato decorre da ligeira diminuição do IDH nessa região específica, indicando uma maior lâmina acumulada de déficit hídrico na região, resultando em valores menos expressivos e exercendo uma influência significativa no  $IADAS$ .

Avaliando, entretanto, o mapa representativo do  $IADAS$ , é perceptível que a maior parte do Cerrado, possui valores de  $IADAS$  maiores, ou seja, mais próximos de um, indicando áreas com maior aptidão ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro. Por exemplo, uma área na região Central do bioma, localizada no município de Corumbá de Goiás, no estado Goiás,

apresenta valor de IADAs igual a 0,630, mostrando maior aptidão ao desenvolvimento da agricultura de sequeiro, para a soja plantada em 15 de setembro, quando comparada a região Norte do bioma, localizada no município de Anapurus no estado do Maranhão, com valor de IADAs igual a 0,323.

Avaliando o mapa de IVP, observa-se que as áreas mais aptas são as áreas localizadas na porção Central do bioma, ao Oeste e Sudeste. Sendo as regiões menos aptas comparativamente, as que estão no Norte, Nordeste, Leste e Sudoeste. Por exemplo, uma área na região Oeste do bioma, localizada no município de Diamantino no estado de Mato Grosso, apresenta valor de IVP igual a 0,629, mostrando maior aptidão ao desenvolvimento da agricultura, para a soja plantada em 15 de setembro, quando comparada a uma área na região Sudoeste, no município de Sidrolândia, no estado do Mato Grosso do Sul, com valor de IVP igual a 0,383.

Na Figura 4 apresenta-se boxplot representando a variação dos valores do índice IVP e dos indicadores IADAI e IADAs, considerando todas as áreas avaliadas no Cerrado.

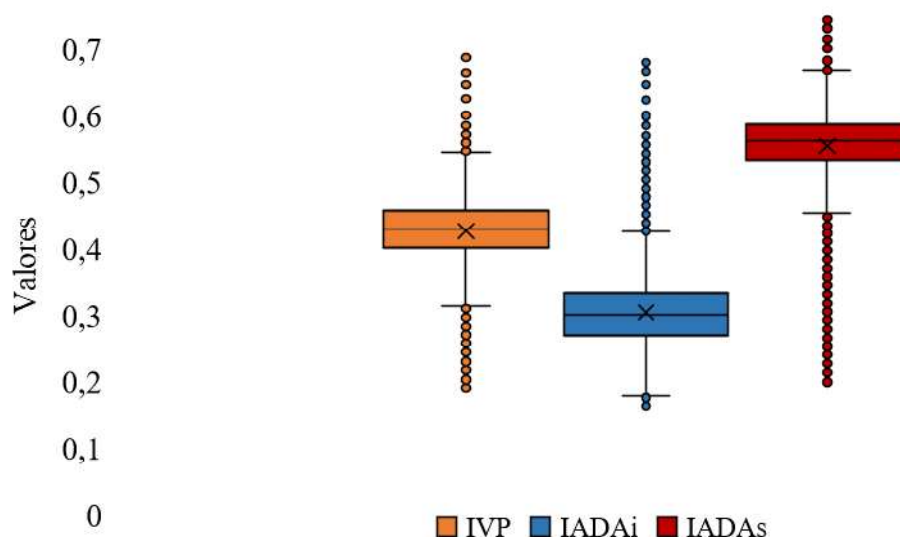


Figura 4 – Boxplot dos valores dos indicadores de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI), da agricultura de sequeiro (IADAs) e do índice de viabilidade de produção de culturas agrícolas anuais (IVP) (c) no Cerrado, para a cultura da soja, plantada no dia 15 de setembro.

Analisando-se a Figura 4 observa-se que os valores de IADAI variaram de 0,163 a 0,679, diferença de 24,9%, com valor médio igual a 0,304. Já os valores de IADAs variaram de 0,211 a 0,738, diferença de 28,6%, com valor médio igual a 0,554. Os valores de IVP variaram entre 0,190 e 0,688, com uma diferença de 27,6%, e o valor médio igual a 0,426. Embora os valores

observados para o IADAs são sempre maiores que os valores de IADAI. É importante, entretanto, enfatizar que esses indicadores não podem ser comparados.

CONEJO et al. (2009), para avaliar a variabilidade da disponibilidade hídrica no Cerrado, utilizaram o indicador de disponibilidade hídrica (IDHidr), desenvolvido para o Brasil. Os resultados desse estudo indicaram que a maior parte da área do Cerrado apresentou boa condição hídrica, sendo possível atender as demandas hídricas. Por outro lado, algumas áreas distribuídas na porção Central, Sudoeste e Norte encontram-se em situações críticas e uma pequena porção do estado da Bahia e Norte de Minas Gerais apresentam uma situação muito crítica, onde o consumo de água tende a ultrapassar a disponibilidade hídrica, evidenciando que nessa região na porção Leste/Nordeste do bioma têm-se, de maneira geral, uma menor disponibilidade. A variabilidade da disponibilidade hídrica observada no trabalho de CONEJO et al. (2009) corrobora os resultados encontrados neste estudo, onde áreas com menor disponibilidade hídrica tendem a apresentar menores valores de IADAI.

Rocha et al. (2013) aplicaram o Índice de Falkenmark para o Brasil e observaram que a maior parte do Cerrado apresenta boa disponibilidade de água e áreas pontuais, na porção Central, Leste e Nordeste, com pressão sobre os recursos hídricos, corroborando também os resultados observados neste trabalho.

Na Figura 5 apresenta-se regiões homogêneas em termos de aptidão agrícola considerando o IADAI, o IADAs e o IVP para o Cerrado, para a cultura da soja plantada em 15 de setembro.



Figura 5 – Regiões homogêneas para os indicadores de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI) (a), e de sequeiro (IADAS) (b), e do índice de viabilidade para produção de culturas agrícolas anuais (IVP) (c) no Cerrado, para a cultura da soja plantada em 15 de setembro.

Ao analisar o Cerrado em relação ao agrupamento de regiões homogêneas em termos de aptidão e viabilidade para o plantio de soja em 15 de setembro, identificou-se cinco regiões distintas (Figura 5). Entre as classes do IADAI, Figura 5a, as regiões pertencentes às classes 3 e 5 exibiram maior aptidão, com valores de IADAI variando de 0,426 a 0,679, enquanto a classe 2 apresentou a menor aptidão, com valores variando de 0,163 a 0,294.

No que diz respeito ao IADAS, Figura 5b, as áreas da classe 4 apresentaram maior aptidão, com valores de IADAS variando de 0,497 a 0,738, enquanto a menor foi observada na classe 1, com valores variando de 0,211 a 0,432. Em relação IVP (c), as áreas agrupadas na classe 3 revelaram maior viabilidade, com valores de IVP variando entre 0,382 e 0,688, enquanto as classes 2 e 4 mostraram menor viabilidade para o plantio da soja iniciado em 15 de

setembro, com valores variando de 0,190 a 0,371. De maneira geral, as regiões do Cerrado que apresentam as melhores de viabilidade para a produção de soja estão localizadas na porção Oeste e Central, em comparação com as regiões Norte e Nordeste do bioma.

### 3.2 Avaliação dos indicadores que compõe o IVP

Para avaliar o comportamento dos indicadores que compõem o IVP, foram escolhidas duas áreas distintas no Cerrado, Figura 6. A Área 1, localizada no município de Magalhães de Almeida, no estado do Maranhão, e a Área 2 no município de Bom Jardim de Goiás, no estado de Goiás. Essas duas foram escolhidas por apresentarem aptidões diferentes em relação ao plantio da soja iniciado em 15 de setembro. A Área 1, localizada ao Norte do bioma Cerrado, possui características da área de transição do Cerrado com a Caatinga, enquanto a Área 2 está mais próxima da área de transição do Cerrado com a Amazônia. Sendo dessa forma comparativamente a Área 2 uma região mais propícia ao desenvolvimento da cultura da soja iniciada em 15 de setembro quando comparada com a Área 1.

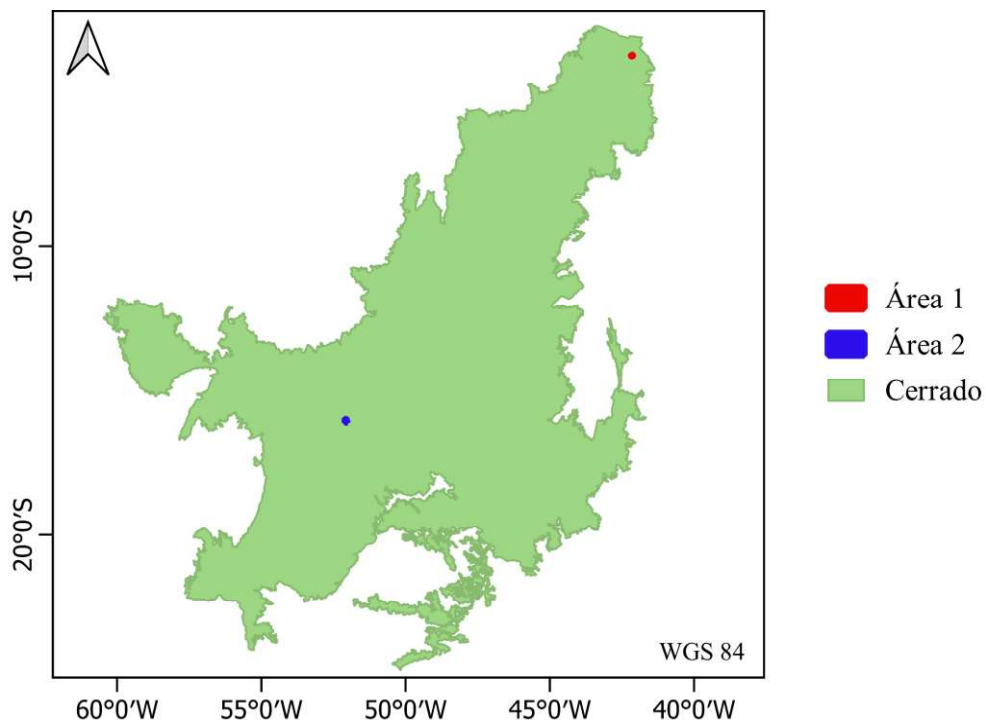


Figura 6 – Localização das áreas utilizadas para avaliar o comportamento dos indicadores que compõem o índice de viabilidade para produção no Cerrado. Área 1: localizada no município de Magalhães de Almeida, no estado do Maranhão; Área 2: localizada no município de Bom Jardim de Goiás, no estado de Goiás.

As análises foram realizadas considerando dezesseis ciclos (2003 a 2019) de simulações. Os valores de IADAI, para as Áreas 1 e 2, foram iguais a 0,183 e 0,324, respectivamente. Isto indica que a Área 2 tem maior potencial para o cultivo da soja irrigada, plantada em 15 de setembro, quando comparado com a Área 1. Os valores de IADAs, para as Áreas 1 e 2, foram iguais a 0,288 e 0,590, respectivamente. Isto indica que a cultura de soja plantada em condições de sequeiro, no dia 15 de setembro, na Área 2 tem maior viabilidade de sucesso que a plantada na Área 1. Esses valores equivalem a F20% de ser igualado ou superado.

Na Figura 7 apresenta-se, os valores temporais, em ordem decrescente do IADAI e IADAs e os respectivos valores correspondente à F20% de ser igualado ou superado para as Áreas 1 e 2 (Figura 6).

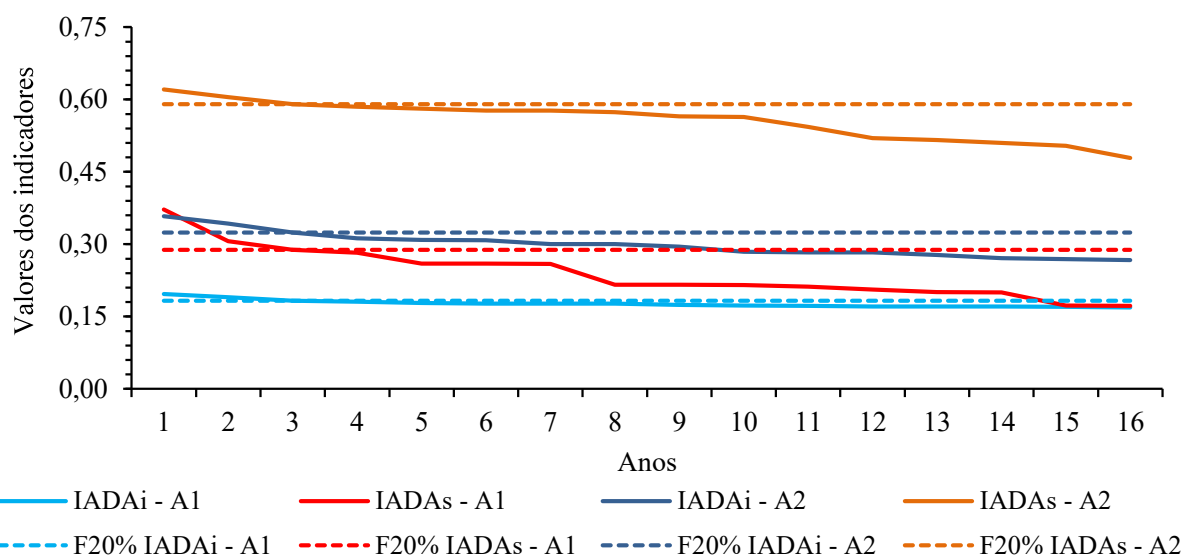


Figura 7 - Valores dos Indicadores de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI), de sequeiro (IADAs) e o valor da frequência de 20% de ser igualado ou superado (F20%), para a cultura da soja plantada no período de 2003 a 2019, em duas áreas do Cerrado A1 e A2.

Os indicadores IADAI e IADAs apresentaram variações, tanto espaciais quanto temporais, no período de 2003 a 2019. Em todos os anos avaliados, os valores de IADAI e de IADAs obtidos na Área 2 foram maiores que os valores observados na Área 1. Os valores de IADAI, para a Área 1, apresentaram pequena variação ao longo dos anos, variando de 0,169 a 0,197, com valor representando a F20% de excedência igual 0,183. Já para a Área 2, os valores de IADAI variaram ao longo dos anos entre 0,267 e 0,358 e, sendo a frequência de ocorrência igual a 0,324.

Observa-se para o IADAs para Área 1 uma variação expressiva em seus valores, tendo oscilado entre 0,172 e 0,372, e o valor da F20% foi igual a 0,288. Já para a Área 2, o IADAs variou de 0,479 a 0,621, com F20% igual a 0,590.

Analisando os diversos indicadores que compõem o IADAs e o IADAI, observa-se que o IS varia espacialmente, mas não varia temporalmente. O IP é constante no espaço e no tempo. Para as Áreas 1 e 2, os valores de IS foram iguais a 0,217 e 0,411, respectivamente. Este resultado indica que a Área 2 tem maior capacidade de armazenamento de água, ou seja, tem mais água disponível para a planta, que a Área 1. O valor de IP foi igual a 0,776. Este valor só vai variar quando se estiver avaliando outra cultura.

Os demais indicadores variam tanto espacial como temporalmente. Na Figura 8 apresenta-se a variabilidade espacial desses indicadores para as duas Áreas consideradas.

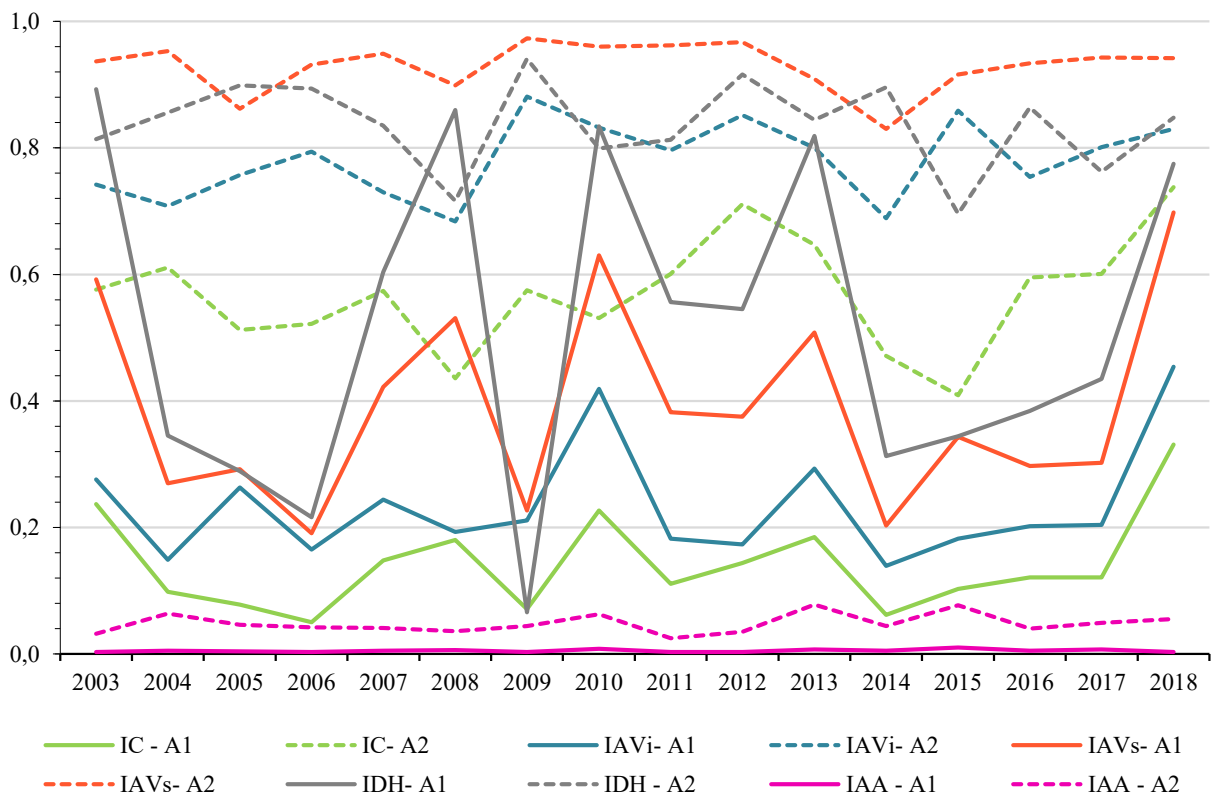


Figura 8 – Representação dos indicadores do clima (IC), água verde na irrigação (IAVi), água verde no sequeiro (IAVs), déficit hídrico (IDH) e da água azul (IAA), para as Áreas 1 e 2, nos anos de 2003 a 2019.

Analisando a Figura 8 observa-se que o IAVs e o IDH, para a Área 1, foram os indicadores que apresentaram as maiores variabilidades temporais. Os valores de IAVs e IDH variaram de 0,191 a 0,698 e 0,066 a 0,893, respectivamente. Enquanto que para a Área 2, a variação

foi de 0,830 a 0,973 para o IAV<sub>s</sub> e de 0,696 a 0,941 para o IDH. Por outro lado, na Área 1, os indicadores IAA e IC, com valores variando de 0,003 a 0,010 e 0,050 a 0,331, respectivamente, foram os que apresentaram a menor variação. Já na Área 2, o IAA variou de 0,025 a 0,078, e o IC foi de 0,409 a 0,738.

O IADAI na Área 1, apresenta indicadores com valores menores que os da Área 2. De maneira semelhante, ao analisar o IADAs, verifica-se que as variáveis que compõem esse indicador na Área 1 possuem valores inferiores em relação à Área 2. Dado que o IVP é a média desses indicadores, ele segue o mesmo padrão, com a Área 1 apresentando valores menores em comparação com a Área 2.

Os valores do IC foram maiores nas regiões Oeste e Noroeste, próximas ao bioma Amazônia, enquanto as regiões Leste, Norte e Nordeste, mais próximas ao bioma Caatinga, apresentaram os valores mais baixos, sugerindo condições menos favoráveis. No que diz respeito ao IAV<sub>I</sub>, as áreas situadas no Oeste, Sudeste e Central do bioma apresentaram valores mais próximos da unidade, contrastando com os valores mais baixos nas regiões Sudoeste, Leste, Norte e Nordeste. Para o IAV<sub>s</sub>, uma parcela reduzida na região Norte e Nordeste do bioma registrou valores próximos a zero, enquanto a maior parte da área, especialmente nas regiões Central, Oeste e Sudeste do Cerrado, apresentou valores mais elevados. No que concerne ao IAA, as maiores magnitudes foram observadas nas áreas Oeste e Sudoeste, contrastando com os valores mais baixos no Leste e Nordeste da região. Finalmente, para o IDH, os valores mais baixos foram identificados no Sudoeste, Norte e Leste do bioma, enquanto as regiões Oeste, Centro e Sudeste exibiram os valores mais elevados.

Ao integrar as informações climáticas à análise, é possível compreender a influência dos biomas vizinhos. A região próxima à transição entre o Cerrado e a Amazônia, caracterizada por um clima tropical de monção, revelou os maiores valores de precipitação total anual média. Em contrapartida, as áreas entre o Cerrado e a Caatinga, com um clima semiárido quente, demonstraram os menores valores de precipitação total anual média, acompanhados pela mais elevada taxa de evapotranspiração de referência média anual total (FERREIRA et al., 2023). Mesmo em regiões com índices elevados de precipitação, como na transição com o Pantanal (ALTHOFF et al., 2021), a taxa de evapotranspiração permanece elevada. Esses padrões climáticos influenciam diretamente nos índices ambientais analisados, delineando um panorama complexo e multifacetado nas diferentes regiões do bioma Cerrado (FERREIRA et al., 2023).

### 3.3 Avaliação da aptidão de áreas no Cerrado ao plantio da soja em diferentes datas de plantio

O IVP foi estimado para a cultura da soja, considerando a plantio nos dias 15 de setembro, 15 de outubro e 15 de novembro.

Os resultados obtidos indicaram que a produção é mais favorável, de modo geral, nas regiões Noroeste, Norte e Nordeste, durante os meses de outubro e novembro, em comparação com o mês de setembro. Nessas regiões a diferença percentual foi mais baixa próxima de 50 a 60%. Contudo, quando comparamos essas mesmas regiões entre os meses de outubro e novembro, embora haja pouca variação em relação ao mês mais indicado para o início do plantio, outubro apresenta valores mais altos do que novembro.

No que diz respeito à região Central, observou-se que não há uma diferença expressiva entre o plantio em setembro e outubro, na maior parte da área, possuindo apenas algumas porções do bioma com diferença percentual de até 116%. Mas há uma diferença notável quando comparado ao início do plantio em setembro em relação a novembro, sendo mais vantajoso iniciar o plantio em setembro, principalmente nas porções Sudoeste e Leste do bioma onde as diferenças percentuais chegam à 165%.

De forma geral, nas porções das regiões Leste, Sudeste, Sudoeste e Oeste, o plantio iniciado em setembro é mais viável para a produção de soja quando comparado aos meses de outubro e novembro. E, ao comparar essas mesmas regiões, outubro se destaca em relação a novembro.

Na Figura 9 apresenta-se as regiões homogêneas referentes ao IVP para diferentes datas de plantio da cultura da soja. As Figuras representam diferenças entre os meses de setembro e outubro, setembro e novembro, e outubro e novembro.

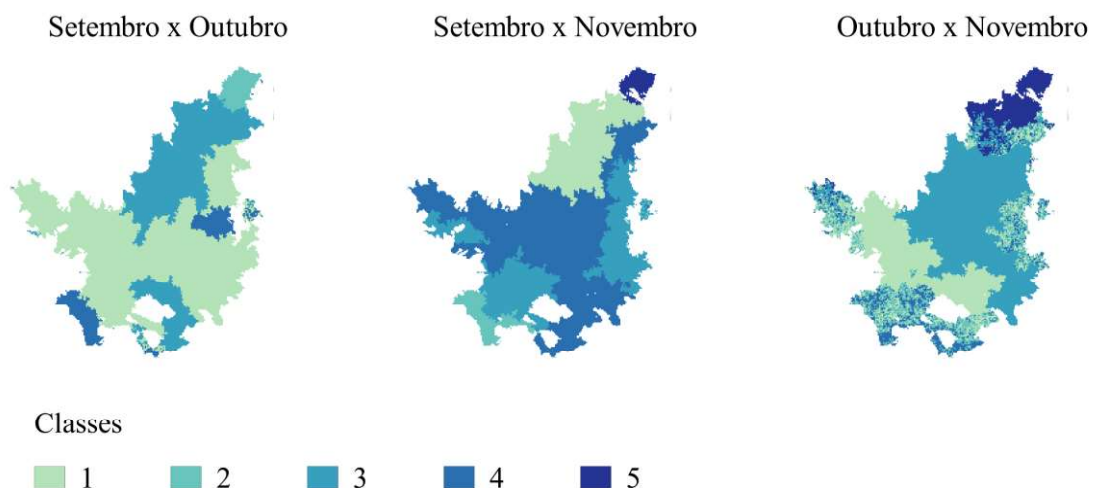


Figura 9 – Índice de viabilidade da produção (IVP) para diferentes datas de plantio da cultura da soja no Cerrado. As Figuras representam diferenças entre os meses de setembro e outubro, setembro e novembro, e outubro e novembro.

Ao analisar a Figura 9, no que diz respeito ao agrupamento de áreas homogêneas no Cerrado e à comparação entre diferentes meses para avaliar a viabilidade do plantio de soja, identificou-se cinco regiões distintas.

No Cerrado é evidente que existe padrões específicos de agrupamento entre as classes. Nota-se que a região Central e Oeste do bioma possuem padrões semelhantes quanto a altos valores de IVP, representados na Figura 9, pela classe 1, nas comparações dos plantios setembro com outubro e outubro com novembro, e pela classe 4 na comparação setembro x novembro. Os valores mais baixos de IVP, foram observados na região Norte do bioma, sendo setembro x outubro, representado pela classe 2, e setembro x novembro e outubro x novembro, pela classe 5.

Na comparação ao longo dos anos simulados dos plantios de setembro x outubro, na classe 1, observou-se que os valores de IVP, em setembro, variaram de 0,273 a 0,688 e em outubro de 0,244 a 0,779. Na comparação do plantio setembro x novembro, para a classe 4, verificou-se que o IVP variou, em setembro, de 0,287 a 0,688 e em novembro de 0,320 a 0,724. Já o IVP de outubro x novembro, para a classe 1, variou em outubro de 0,327 a 0,742 e novembro entre 0,316 e 0,724.

O IVP com valores menores apresentou para setembro x outubro, nas regiões da classe 2, variação em setembro de 0,178 a 0,379 e outubro de 0,244 a 0,407. O IVP de setembro x novembro, para a classe 5, variou em setembro 0,185 a 0,361 e novembro de 0,336 a 0,457. Já o IVP de outubro x novembro, para a classe 5, variou em outubro de 0,274 a 0,402 e novembro entre 0,336 e 0,457.

A aplicação do IVP considerando culturas plantadas em diferentes períodos, possibilita ao gestor planejar de maneira mais eficiente o desenvolvimento da região. Silva Neto et al. (2010) cometam que o plantio realizado na época adequada contribui efetivamente para alcançar o máximo potencial produtivo da cultura e impacta positivamente tanto na produtividade quanto na lucratividade.

Aproximadamente 80% dos pivôs centrais instalados no Brasil estão localizados em áreas do Cerrado (ALTHOFF e RODRIGUES, 2019). Na Figura 10 apresenta-se a evolução, 2005 a 2019, das áreas irrigadas por pivô central no Cerrado. Comparando-se as áreas irrigadas

no ano de 2005 com a irrigação no ano de 2019, observa-se um aumento na área irrigada de 122%, com maior concentração de pivôs nas regiões Centrais e Sudoeste do bioma do Cerrado.

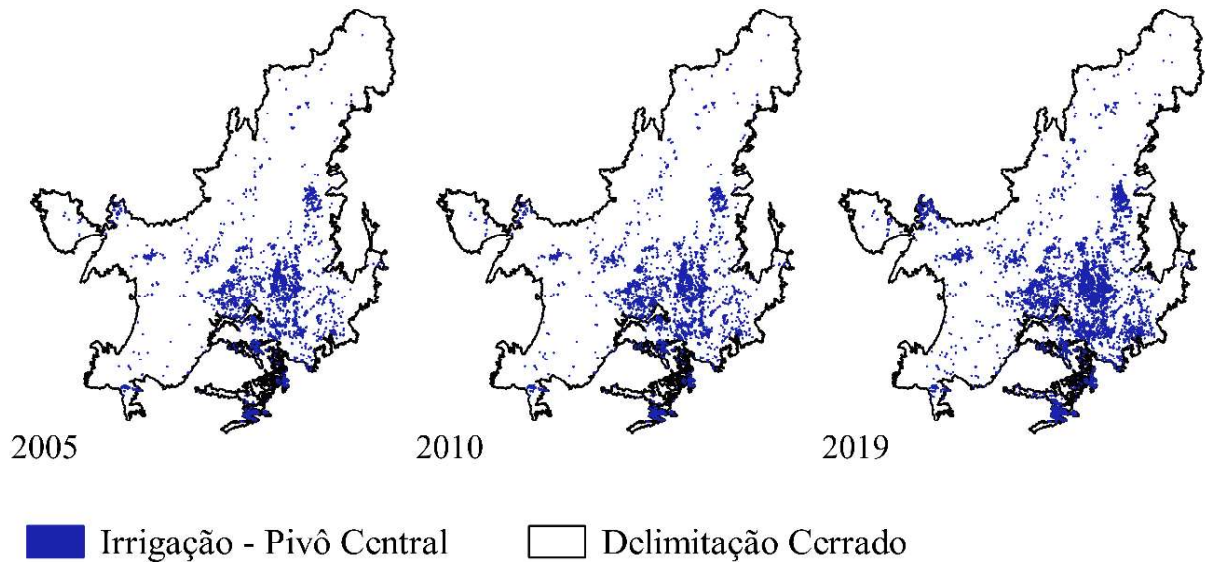


Figura 10 - Irrigação por pivô central no bioma Cerrado nos anos de 2005, 2010 e 2019.

Na Figura 11 apresenta-se mapas do IADAI, para os anos de 2005, 2010 e 2018, para a plantio da soja no dia quinze dos meses de setembro, outubro e novembro.

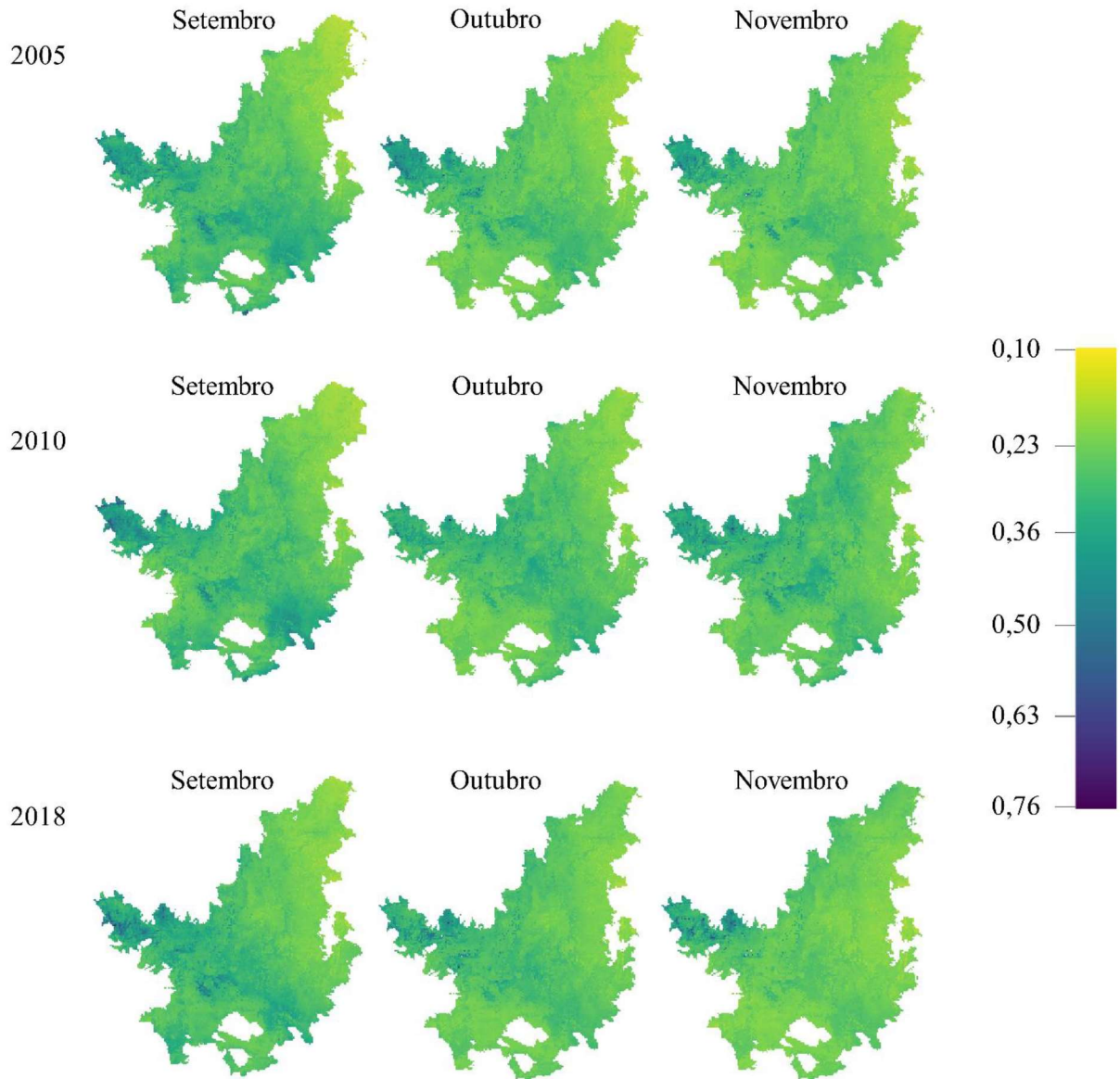


Figura 11 – Índice de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI) no Cerrado, nos anos de 2005, 2010 e 2018, para a plantio da soja no dia quinze dos meses de setembro, outubro e novembro.

Comparando as Figuras 10 e 11, observa-se que as áreas onde ocorreram os maiores crescimentos da agricultura irrigada foram aquelas onde observou altos valores de IADAI. Ou seja, mesmo com todo o crescimento da irrigação naquelas áreas, elas ainda são as áreas que apresentam as melhores aptidões. Essas áreas estão localizadas nas regiões Oeste, Centro-Noroeste e Sudoeste do Cerrado, particularmente para a plantio com início no mês de setembro, com valores de IADAI chegando a 0,750.

Além disso, vale ressaltar que o crescimento da agricultura irrigada observado nessas regiões do Cerrado pode ser atribuído, de forma conjunta, à capacidade de retenção de água

pelo solo, ao clima, à água verde e à disponibilidade hídrica superficial para o crescimento da agricultura irrigada, além da implementação eficiente de tecnologias de irrigação e práticas agrícolas inovadoras.

#### 4. Conclusões

O Índice de Viabilidade para Produção de Culturas Agrícolas Anuais (IVP) é uma ferramenta para subsidiar o planejamento da agricultura, contribuindo para que seu crescimento seja organizado e sustentável. O IVP apresenta informações geradas com base na planta, no solo, no clima e na disponibilidade hídrica que possibilita ao gestor avaliar, dentro de uma região, quais são as áreas com maior ou menor aptidão para o desenvolvimento da agricultura. Para isto pode-se avaliar diferentes culturas, datas de plantio e rotações de cultura.

O IVP não foi desenvolvido para indicar se uma cultura pode ou não pode ser produzida em uma área específica. O seu objetivo é indicar áreas mais aptas dentro de uma região. É importante ressaltar que uma área mais apta ao plantio de determinada cultura em um período, pode não ser a melhor em outro período.

É importante destacar que os indicadores de aptidão ao desenvolvimento da agricultura, como os indicadores de aptidão ao desenvolvimento da agricultura irrigada (IADAI) e da agricultura de sequeiro (IADAS), não devem ser diretamente comparados entre si. O IADAI focaliza as áreas mais propícias para a produção de culturas irrigadas, enquanto o IADAS identifica as regiões favorecidas para o cultivo em sistema de sequeiro.

Os valores do IVP para a cultura da soja, com data de plantio em setembro, variaram de 0,001 a 0,688, em outubro de 0,219 a 0,779 e novembro de 0,000 a 0,780, sendo o plantio mais favorável nas regiões Noroeste, Norte e Nordeste durante os meses de outubro e novembro em comparação com setembro. Embora haja pouca variação entre outubro e novembro nessas regiões, outubro se destaca com valores mais altos. Na região Central do Cerrado, a diferença entre o plantio em setembro e outubro não é significativo. No entanto, essas regiões são mais aptas ao plantio em setembro do que em novembro. Nas regiões Leste, Sudeste, Sudoeste e Oeste, o plantio em setembro se mostra mais viável em comparação com outubro e novembro. Dentro dessas regiões, outubro se destaca como o mês de maior aptidão para o cultivo de soja.

As áreas localizadas nas regiões Oeste, Central e Sudeste do bioma Cerrado são identificadas como as mais propícias para o desenvolvimento da agricultura irrigada de soja, destacando-se pela maior aptidão. Por outro lado, as áreas menos favoráveis estão situadas nas regiões Leste, Norte e Nordeste do Cerrado. No que diz respeito à agricultura de sequeiro, verifica-se que as porções menos aptas para o cultivo de soja estão concentradas no Norte, Nordeste,

Leste e Sudoeste da região do Cerrado. Entretanto, a maior parte do Cerrado demonstra aptidão para o plantio e desenvolvimento de cultivares em sistema de sequeiro.

### 3. Conclusões gerais

A análise desses três capítulos possibilita tirar diversas conclusões importantes sobre a região do Cerrado e seus desafios relacionados à água e agricultura. No capítulo 1, observa-se as expressivas variações nas vazões mínimas de referência ao longo do ano, com março registrando as maiores vazões mínimas mensais e outubro as menores, indicando a importância da adoção da outorga sazonal para o desenvolvimento da região.

As diferenças nos critérios de vazões mínimas de referência adotados pelos estados que compõem o Cerrado podem criar distorções no desenvolvimento de algumas regiões, uma vez que alguns estados apresentam índices de outorga mais permissivos ao uso da água, indicando a necessidade de padronização dos critérios.

As tendências de redução no balanço hídrico climatológico indicam diminuição na precipitação e/ou um aumento na evapotranspiração de referência. Essas tendências podem ter implicações significativas nas condições hidrológicas e no uso da água na região, potencialmente impactando o desenvolvimento da região.

O Índice de Viabilidade para Produção de Culturas Anuais é uma ferramenta que foi desenvolvida para subsidiar o planejamento, visando o desenvolvimento organizado e sustentável da agricultura. Ele se apresenta como uma ferramenta valiosa para avaliar a aptidão agrícola de áreas dentro de uma região, indicando as melhores culturas, épocas de plantio e rotações de cultura.

Em termos de cultivo de soja, este estudo aponta para diferentes regiões do Cerrado, onde o plantio é mais favorável em diferentes meses. Por exemplo, a viabilidade da produção de soja é mais favorável nas regiões Noroeste, Norte e Nordeste plantando nos meses de outubro e novembro em comparação com setembro. Embora haja pouca variação entre outubro e novembro nessas regiões, outubro se destaca com valores mais altos. Já na região Central do Cerrado, a diferença entre o plantio em setembro e outubro não é significativa. No entanto, quando comparamos o plantio em setembro com novembro, torna-se evidente que setembro é a escolha mais vantajosa. E nas regiões Leste, Sudeste, Sudoeste e Oeste, o plantio em setembro se mostra mais viável em comparação com outubro e novembro. Dentro dessas regiões, outubro se destaca como o mês de maior aptidão para o cultivo de soja. Essas descobertas oferecem valiosas diretrizes para os agricultores na escolha das datas de plantio.

## Referências

- ALCAMO, J.; HENRICH, T. Critical regions: A model-based estimation of world water resources sensitive to global changes. **Aquatic Sciences**, v. 64, n. 4, p. 352-362, 2002. <https://doi.org/10.1007/PL00012591>
- ALIZADEH, H.; MOUSAVI, S. J. Coupled stochastic soil moisture simulation-optimization model of deficit irrigation. **Water Resources Research**, v. 49, n. 7, p. 4100-4113, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20282>
- ALLEN, E.; VALDES C. **Brazil's corn industry and the effect on the seasonal pattern of US corn exports**. USA: United States Department of Agriculture, Economic Research Service (USDA), 2016.
- ALTHOFF, D.; BAZAME, H. C.; FILGUEIRAS, R.; RODRIGUES, L. N. Assessing rainfall spatial variability in the Brazilian savanna region with TMPA rainfall dataset. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 111, p. 103482, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103482>
- 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, p. e2 020WR027562, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020WR027562>
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. **Recursos Hídricos Superficiais no Cerrado**. In: Rodrigues, L. N (Editor técnico). Agricultura irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023, p. 19-33.
- 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. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023, p. 61-89.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the Cerrado biome. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56-61, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v1n1p56-61>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105315>
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, N. L.; SILVA, D. D. da. Assessment of water availability vulnerability in the Cerrado. **Applied Water Science**, v. 11, n. 176, 2021b. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01521-2>
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. **Climatic change**, v. 140, p. 33-45, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0909-y>
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.D.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Irrigação: Uso de água na agricultura irrigada**. Brasília - DF, Brasil, 86 p., 2017 a.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas irrigação: Uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, DF, Brasil. 130 p, 2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Codificação de bacias hidrográficas pelo método Otto Pfafstetter**. 2014. Disponível em: < <https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/104/1/apostila.pdf> >. Acesso em: 04 mai 2020.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017**: relatório pleno. Brasília, DF, 169 p. 2017b.

ANA -Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos**. Brasília: SAG, 50 p. 2017c.

ARAI, F.K.; RAMOS, D.D.; INOCÊNCIO, H.J.; SANTOS, F.A. Seasonality and criteria for concession of water in the Ivinhema basin. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e1969108391-e1969108391, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8391>.

ARANTES, A.E.; FERREIRA, L.G.; COE, M.T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>.

ASSAD, E.D.; VICTORIA, D.D.E.C.; CUADRA, S.V.; PUGLIERO, V.S.; ZANETTI, M.R. **Efeito das mudanças climáticas na agricultura do Cerrado**. In Dinâmica Agrícola no Cerrado: Análises e Projeções, 1st ed.; BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. Technical Eds.; Embrapa Sede: Brasília, Brasil, 2020.

ASSANI, A.A.; CHALIFOUR, A.; LÉGARÉ, G.; MANOUANE, C.S.; LEROUX, D. Temporal regionalization of 7-day low flows in the St. Lawrence watershed in Quebec (Canada). **Water resources management**, v. 25, p. 3559-3574, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9870-6>

BAGGIO, G.; QADIR, M.; SMAKHTIN, V. Freshwater availability status across countries for human and ecosystem needs. **Science of The Total Environment**, v. 792, p. 148230, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148230>

BEEBE, D.A.; CASTLE, J.W.; MOLZ, F.J.; RODGERS JR, J.H. Effects of evapotranspiration on treatment performance in constructed wetlands: Experimental studies and modeling. **Ecological engineering**, v. 71, p. 394-400, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.052>.

BEHZADI, F.; YOUSEFI, H.; JAVADI, S.; MORIDI, A.; SHAHEDANY, S.M.H.; NESHAT, A. Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, n. 3-4, p. 1297-1315, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04113-5>.

BERGHUIJS, W. R.; SIVAPALAN, M.; WOODS, R. A.; SAVENIJE, H. H Patterns of similarity of seasonal water balances: A window into streamflow variability over a range of time scales. **Water Resources Research**, v. 50, n. 7, p. 5638-5661, 2014. <https://doi.org/10.1002/2014WR015692>

BOF, L.H.N.; PRUSKI, F.F.; SILVA, L.M.C.; JUSTINO, F. Analysis of appropriate timescales for water diversion permits in Brazil. **Environmental management**, v. 51, p. 492-500, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9982-7>

BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. **Introdução**. In: BOLFE, E.L.; SANO, E.E.; CAMPOS, S.K. (Technical editors). Dinâmica agrícola no cerrado: análises e projeções. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 15-20, 2020. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1121716> (Accessed 30 March 2021).

BOWERS, M.C.; TUNG, W.W.; GAO, J.B. 2012. On the distributions of seasonal river flows: lognormal or power law? **Water Resources Research**, v. 48, n. 5, 2012.. <https://doi.org/10.1029/2011WR011308>

Brasil - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Exportações do agronegócio sobem 6% em 12 meses e somam US\$ 102,14 bilhões**. 2019. <http://antigo.agricultura.gov.br/noticias/exportacoes-do-agro-em-12-meses-somam-us-102-14-bilhoes> (Accessed 18 May 2020).

Brasil – Ministério da Agricultura e Pecuária. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático**. 2023

Brasil 1997 Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos**, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm) (Accessed 28 February 2021).

BRASIL. **Análise territorial para o desenvolvimento da agricultura irrigada no Brasil**. Brasília: MI, 217 p. 2014.

BROWN, Thomas C.; MAHAT, Vinod; RAMIREZ, Jorge A. Adaptation to future water shortages in the United States caused by population growth and climate change. **Earth's Future**, v. 7, n. 3, p. 219-234, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018EF001091>

BUREK, P.; SATOH, Y.; FISCHER, G.; KAHIL, M. T.; SCHERZER, A.; TRAMBEREND, S.; NAVA, L. F.; WADA, Y.; EISNER, S.; FLÖRKE, M.; HANASAKI, N.; MAGNUSZEWSKI, P.; COSGROVE, B.; WIBERG, D. Water futures and solution: fast track initiative (final report). Laxenburg, Austria: **IIASA Working Paper**, WP-16-006, 2016.

BYRNE, M. P.; O’GORMAN, P. A. The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: Why the “wet-get-wetter, dry-get-drier” scaling does not hold over land. **Journal of Climate**, v. 28, n. 20, p. 8078-8092, 2015.

CAMBRAIA NETO, A.J.; RODRIGUES, L.N. Impact of land use and occupation on potential groundwater recharge in a Brazilian savannah watershed. **Water International**, v. 46, n. 3, p. 348-364, 2021. <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1898862>

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. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351019>.

CARVALHO, H.D.P.; DOURADO NETO, D.; TEODORO, R.E.F.; MELO, B.D. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, p. 221-229, 2011. Available online: <http://fi-admin.bvsalud.org/document/view/zwcsy> (accessed on 15 January 2022).

CASSETTARI, G.A.; QUEIROZ, T.M. Balanço hídrico e classificação climática na bacia do rio Jauquara, região de transição entre o cerrado e Amazônia brasileira. **Revista brasileira de climatologia**, v. 26, p. 1-19, 2020. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.59513>.

CASTRO, E.R.R.S.; MOREIRA, M.C.; SILVA, D.D. 2016 Environmental flow in the River Ondas basin in Bahia, Brazilian Cerrado. **Environmental monitoring and assessment**, v. 188, p. 1-10, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5063-8>

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J., ... MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5

downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>

CINTRA, P. H. N.; MELO, O. F. P.; MENEZES, J. O. S. Produção agrícola: Uma revisão bibliográfica sobre as mudanças climáticas e produtividade de plantas graníferas no Brasil. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020. oai:ojs.pkp.sfu.ca:article/9720. Acessado em: 20 de junho de 2023

COLLARES, E.G.; ARAUJO, E.; SILVA, B.C.B.; GONÇALVES, G.G., NASCIMENTO, A.C. Análise comparativa entre vazão medida e vazão regionalizada em três pares de bacias hidrográficas morfometricamente semelhantes do estado de Minas Gerais. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 3, 2022. <https://rmrh.igam.mg.gov.br/ojs3/index.php/NM/article/view/60/80>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Safras Grãos: série histórica**. 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras> >. Acesso em: 20 mai 2020.

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.

COSTA E SILVA, D.D.; CHAVES, H.M.L.; CURI, W.F.; BARACUHY, J.G.V.; CUNHA, T.P.S. Application of the watershed sustainability index in the Piranhas-Açu watershed. **Water Policy**, v. 22, n. 4, p. 622-640, 2020.. <https://doi.org/10.2166/wp.2020.011>

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

D'ANGIOLELLA, G.L.B.; VASCONCELLOS, V.L.D.; RODRIGUEZ, F.A. **Balço hídrico climático do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul**. In Proceedings of the XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Aracaju, Brazil, 2–5 July 2007. Available online: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/2641.pdf> (accessed on 14 January 2022).

DAMKJAER, S., TAYLOR, R. The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. **Ambio**, v. 46, n. 5, p. 513-531, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0912-z>

DEBORTOLI, N.S.; DUBREUIL, V.; HIROTA, M.; FILHO, S.R.; LINDOSO, D.P.; NABUCET, J. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889-2900, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.4886>.

DI NUNNO, F.; GRANATA, F. Future trends of reference evapotranspiration in Sicily based on CORDEX data and Machine Learning algorithms. **Agricultural Water Management**, v. 280, p. 108232, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108232>.

EGGER, D.S.; RIGOTTO, R.M.; SOUZA, F.A.N.; COSTA, A.M.; AGUIAR, A.C.P. Ecocídio nos Cerrados: Agronegócio, espoliação das águas e contaminação por agrotóxicos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 57, p. 16-54, 2021. <https://doi.org/10.5380/dma.v57i0.76212>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Estimativa de água disponível dos solos do Brasil** (Primeira aproximação). Vector Data. 2021. Disponível em: <<http://geoinfo.cnps.embrapa.br/documents/3019/download>>. Acesso 26 junho de 2023.

- EVANS, R. G.; SADLER, E. J. Methods and technologies to improve efficiency of water use. **Water resources research**, v. 44, n. 7, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>
- FALKENMARK, M. Fresh water: Time for a modified approach. **Ambio**, p. 192-200, 1986. <http://www.jstor.org/stable/4313251>. Accessed 17 July 2021.
- FALKENMARK, M. Meeting water requirements of an expanding world population. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 352, n. 1356, p. 929-936, 1997. <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0072>
- FALKENMARK, M.. The massive water scarcity now threatening Africa: why isn't it being addressed?. **Ambio**, p. 112-118, 1989. <http://www.jstor.org/stable/4313541>. Accessed 17 July 2021.
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>
- FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J.; KARLBERG, L. Present and future water requirements for feeding humanity. **Food security**, v. 1, n. 1, p. 59-69, 2009. <https://doi.org/10.1007/s12571-008-0003-x>
- FAO - Organização das nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (2017) **Representante da FAO Brasil apresenta cenário da demanda por alimentos**. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/901168/>>. Acessado em: Junho, 2023
- FAPDA – Food and Agriculture Policy Decision Analysis. **Brazil fact sheet on food and agriculture policy trends**. 2014. <http://www.fao.org/3/i3759e/i3759e.pdf> (Accessed 04 June 2020).
- FARIAS, D.B.S.; RODRIGUES, L. N. **Agricultura Irrigada no Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N (Editor técnico). *Agricultura irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável*. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023, p. 177-200.
- FERRARINI, A.D.S.F.; FERREIRA FILHO, J.B.D.S.; CUADRA, S.V.; VICTORIA, D.D.C. Water demand prospects for irrigation in the São Francisco River: Brazilian public policy. **Water Policy**, v. 22, n. 3, p. 449-467, 2020. <https://doi.org/10.2166/wp.2020.215>
- 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, n. 10, p. 1820, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15101820>
- FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da. Influence of changes in land use and land cover and rainfall on the streamflow regime of a watershed located in the transitioning region of the Brazilian Biomes Atlantic Forest and Cerrado. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 1, p. 1-17, 2021b. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08782-5>
- FERREIRA, F. L. V.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. da.; TEIXEIRA, D. B. de. S.; ALMEIDA, L. T. de. Time series trends of streamflow and rainfall in the Santo Antônio river basin, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 47-55, 2021a. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n1p47-55/2021>
- FINKLER, N.R.; MENDES, L.A.; SCHEIDER, E.H.M.; BORTOLIN, T.A.; SCHEIDER, V.E. Comparação de funções de distribuição de probabilidades na determinação de vazão mínima

anual e sazonal. **Scientia Cum Industria**, v. 3, n. 2, p. 42-49, 2015. <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v3iss2p42>

FRANCISCO, E.A.B.; KAPPES, C. Cerrado brasileiro carece de mais investimentos em práticas sustentáveis. **Visão Agrícola**, v. 10, p. 55-57, 2012. <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/VA10-visao-setorial04.pdf> (Accessed 22 March 2020).

FRANCO, E.G. The global risks report 2020. In: **World Economic Forum**. 2020. Disponível em: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risk\\_Report\\_2020.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf). Acesso em: 22 de janeiro de 2023

FRISCHKNECHT, R; BÜSSER, S.; KREWITT, W. Environmental assessment of future technologies: how to trim LCA to fit this goal? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 14, n. 6, p. 584-588, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0120-6>

GERTEN, D.; HEINKE, J.; HOFF, H.; BIEMANS, H.; FADER, M.; WAHA, K. Global water availability and requirements for future food production. **Journal of hydrometeorology**, v. 12, n. 5, p. 885-899, 2011. <https://doi.org/10.1175/2011JHM1328.1>

GOMES, R.R.K.D.A.; FERNANDES, L.L. 2017 Hydrological characterization of the Araguaia River through reference flows. **Applied Water Science**, v. 7, p. 4605-4614, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0622-5>

GOSLING, S. N.; ARNELL, N. W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, v. 134, p. 371-385, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>

HANASAKI, N.; KANAE, S.; OKI, T.; MASUDA, K.; MOTOYA, K.; SHIRAKAWA, N.; TANAKA, K. An integrated model for the assessment of global water resources--Part 2: Applications and assessments. **Hydrology & Earth System Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1027-1037, 2008. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1027-2008>

HANNAFORD, J.; BUYS. G. Trends in seasonal river flow regimes in the UK. **Journal of Hydrology**, v. 475, p. 158-174, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.044>

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water resources research**, v. 18, n. 1, p. 107-121, 1982. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>

HOEKSTRA, A. Y., CHAPAGAIN, A. K., ALDAYA, M. M., MEKONNEN, M. M. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. **Routledge**, 2011.

HOFFMANN, W.A.; JACKSON, R.B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of climate**, v. 13, n. 9, p. 1593-1602, 2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)13%3C1593:VCFITC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)13%3C1593:VCFITC%3E2.0.CO;2)

HOFMANN, G. S.; CARDOSO, M. F.; ALVES, R. J.; WEBER, E. J.; BARBOSA, A. A.; DE TOLEDO, P. M.; PONTUAL, F. B.; SALLES, L. O.; HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; AQUINO, F. E.; DE OLIVEIRA, L. F. B. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. **Global Change Biology**, v. 27, n. 17, p. 4060-4073, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; BRAITHWAITE, D.; HSU, K.; JOYCE, R.; KIDD, C.; NELKIN, E. J.; SOROOSHIAN, S.; TAN, J.; XIE, P. **Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)**: Algorithm Theoretical Basis Document. [S. l.]: National Aeronautics and Space Administration, 2019a. Disponível em: [https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/IMERG\\_ATBD\\_V06.pdf](https://docsserver.gesdisc.eosdis.nasa.gov/public/project/GPM/IMERG_ATBD_V06.pdf).

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), 2019b. Disponível em: [10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPMIMERGDFDAY06/06).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária 2018a Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html?=&t=o-que-e>. Acesso em 22 de agosto de 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola e pecuária municipal: censo agropecuário, produção e extração vegetal da silvicultura**. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil>. Acesso em: 20 mai 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores IBGE: Levantamento Sistemático da Produção Agrícola e Estatística da Produção Agrícola**. Brasília: IBGE, Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html?=&t=downloads>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Portaria IGAM N° 48**, de 04 de Outubro de 2019. <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=49719> (Accessed 22 August 2021).

JESUS, T.C.L.; SENNA, M.C.A.; CATALDI, M.; PAIVA, C.M.; FRANZ, B. Impacto do aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> no balanço hídrico climatológico do Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 1-14, 2017. Available online: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima> (accessed on 20 May 2022)

JU, C.; BURESH, R. J.; WANG, Z.; ZHANG, H.; LIU, L.; YANG, J.; ZHANG, J. (2015). Root and shoot traits for rice varieties with higher grain yield and higher nitrogen use efficiency at lower nitrogen rates application. **Field Crops Research**, v. 175, p. 47-55, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.007>

KENDALL, M.G. Rank Correlation Methods. **Charles Griffin**, London, UK. 1975.

KIMBALL, B. F. On the choice of plotting positions on probability paper. **Journal of the American Statistical Association**, v. 55, n. 291, p. 546–560, 1960.

KLINK, C.A. Policy intervention in the cerrado savannas of brazil: changes in land use and effects on conservation. **A. Consorte-McCrea, & E. Ferraz Santos, Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives**, p. 293-308, 2014.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. 2005 A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

LE MOINE, N. **Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit?**. 2008. Tese de Doutorado. Doctorat Géosciences et Ressources Naturelles, Université Pierre et Marie Curie Paris VI.

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

LEMOES, R. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Reflexões sobre os critérios de cálculo de vazões outorgáveis em áreas de conflito do estado de Minas Gerais: o caso da Bacia do Ribeirão

Ribeiro Bonito. **Revista Espinhaço**, v. 4, n. 2, p. 4-12, 2015. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3962255>

LIU, J.; LIU, Q.; YANG, H. Assessing water scarcity by simultaneously considering environmental flow requirements, water quantity, and water quality. **Ecological indicators**, v. 60, p. 434-441, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.019>

LIU, J.; YANG, H.; GOSLING, S. N.; KUMMU, M.; FLÖRKE, M.; PFISTER, S.; OKI, T. Water scarcity assessments in the past, present, and future. **Earth's future**, v. 5, n. 6, p. 545-559, 2017. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>

MALDANER, L. J.; HORING, K.; SCHNEIDER, J. F.; FRIGO, J. P.; AZEVEDO, K. D.; GRZESIUCK, A. E. Exigência agroclimática da cultura do milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Energia Renováveis**, v. 3, n. 1, p. 13-23, 2014. <https://doi.org/10.5380/RBER.V3I1.36915>

MANN, H.B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v.13, n. 7, 245-259. 1945.

MAPBIOMAS, **Coleção 4.1**, 2020. Disponível em: < [https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Mapa%20Mural/Mapbiomas\\_2018\\_Col4\\_1\\_Cerrado.pdf](https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Mapa%20Mural/Mapbiomas_2018_Col4_1_Cerrado.pdf)>. Acesso em: 04 jun 2020.

MAPBIOMAS. **Coleção 4.1**. 2020 [https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Mapa%20Mural/Mapbiomas\\_2018\\_Col4\\_1\\_Cerrado.pdf](https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Mapa%20Mural/Mapbiomas_2018_Col4_1_Cerrado.pdf) (Accessed 04 June 2020).

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; EVANGELISTA, S. R. M. **A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente**. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (Ed.). *Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas*. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 1, p. 20-45. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217698/1/LV-Agricultura-digital-313>, n. 5790, p. 1068-1072, 2006. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>

MEADE, B.; PURICELLI, E.; MCBRIDE, W.D.; VALDES, C.; HOFFMAN, L.; FOREMAN, L.; DOHLMAN, E. Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States. **USDA Economic Information Bulletin**, v. 154, 2016. <https://ssrn.com/abstract=2981675> (Accessed 29 July 2021).

MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Science advances**, v. 2, n. 2, p. e1500323, 2016. DOI: 10.1126/sciadv.1500323

MILHORANCE, C.; SABOURIN, E.; CHECHI, L. **Adaptação às mudanças climáticas e integração de políticas públicas no semiárido pernambucano**. Brasília: INCT, 44 p. 2018. (Texto para Discussão **Working Paper: INCT**, 1). Disponível em: <<http://inct-odisseia.i3gs.org/wp-content/uploads/2019/12/WP2.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2022.

MOREIRA, A. A.; RUHOFF, A. L.; ROBERTI, D. R.; DE ARRUDA SOUZA, V.; ROCHA, H. R.; DE PAIVA, R. C. D. Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 131-147, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.021>

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, n. 9, p. 0–13, set. 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001556](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001556)

MUNIA, H.; GUILLAUME, J. H. A.; MIRUMACHI, N.; PORKKA, M.; WADA, Y.; KUMMU, M. Water stress in global transboundary river basins: significance of upstream water use on downstream stress. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 1, p. 014002, 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014002>

OLIVEIRA, J.A.M. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Carbonita-MG. **Rev. Bras. Geogr. Física**, v. 16, p. 755-764, 2023. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.2.p755-764>.

OLIVEIRA, J.R.S.; PRUSKI, F.F.; NUNES, A.D.A. Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do ribeirão Entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n. 4, 2013. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n4.p157-172>

OLIVEIRA, K.P.D.; MATOS, T.S.; SOUSA JUNIOR, M.F.D.; ULIANA, E.M. Vazões mínimas de referência Q95, Q90 e Q7,10 para a bacia do rio Jequitinhonha, Minas Gerais. **V Jornada Acadêmica da Engenharia Agrícola e Ambiental**. UFMT, Campus Universitário de Sinop, 2017.

OLIVEIRA, P.T.S.; NEARING, M.A.; MORAN, M.S.; GOODRICH, D.C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H.V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7100-7114, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013WR015202>

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande River basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.5138>

OUYANG, Y. A potential approach for low flow selection in water resource supply and management. **Journal of Hydrology**, v. 454, p. 56-63, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.062>

PASSOS, M. L. V.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Scientia agraria**, v. 18, n. 1, p. 83-89, 2017.

PETTITT, A. N. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. <https://doi.org/10.2307/2346729>

PFISTER, S.; HELLWEG, A. K. S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. **Environmental science & technology**, v. 43, n. 11, p. 4098-4104, 2009. <https://doi.org/10.1021/es802423e>

PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L. J.; COSTA, M. H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R. J. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286-298, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A. D.; CASTRO, M. Climate change and intense irrigation growth in Western Bahia, Brazil: The urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v. 11, n. 5, p. 933, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11050933>

POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A. de; CASTRO, M. Climate change and intense irrigation growth in western Bahia, Brazil: The

urgent need for hydroclimatic monitoring. **Water**, v. 11, n. 5, p. 933, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11050933>

PRĂVĂLIE, R.; PITICAR, A.; ROȘCA, B.; SFÎCĂ, L.; BANDOC, G.; TISCOVSCHI, A.; PATRICHE, C. Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013. **Catena**, v. 172, p. 295-312, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.028>

PRUSKI, F.F.; BOF, L.H.; SILVA, L.; SILVA, J.; REGO, F.S.; JUSTINO, F.B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 496-509, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000300013>

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2021) R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível: <http://www.r-project.org>, acesso em: 30 nov 2021.

RAMOS, D.D.; PEREIRA, S.B.; ARAI, F.K.; SANTOS, F.A.D.; CARNEVALI, T.D.O. Water seasonality in granting permits and impact of irrigation in the Dourados River basin, MS, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 499-504, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p499-504>.

RAMOS, M.C.A.; PRUSKI, F.F.; GENEROSO, T.N.; PINTO, E.J.A. Methodology for Optimizing Water Use in Shared Management Schemes Under Conflict Conditions. **Water Resources Management**, v. 35, p. 3161-3177, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02870-y>.

RÁPALO, L. M. C.; ULIANA, E. M.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D.; RIBEIRO, C. B. M.; CRUZ, I. F.; PEREIRA, D.R. Effects of land-use and-cover changes on streamflow regime in the Brazilian Savannah. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 38, p. 100934, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100934>

REILLY, C.F.; KROLL, C.N. Estimation of 7-day, 10-year low-streamflow statistics using baseflow correlation. **Water resources research**, v. 39, n. 9, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002WR001740>

ROCHA, N. C. V.; LIMA, A. M. M. D. A sustentabilidade hídrica na bacia do rio Guamá, Amazônia Oriental/Brasil. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 141-160, 2020. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-45694>

ROCKSTRÖM, J. et al. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change. **Water resources research**, v. 45, n. 7, 2009.

RODRIGUES, L. N.; ALTHOFF, D.; SANTANA, N. C.; FARIAS, D B DOS S. **Importância da Agricultura Irrigada para a Sustentabilidade da Produção de Alimentos no Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N (Editor técnico). *Agricultura irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável*. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023, p. 19-33.

RODRIGUES, L. N.; JMMAP, MOREIRA. Desenvolvimento de um modelo de simulação de estratégias de irrigação. In: **Anais do III Inovagri International Meeting-2015. INOVAGRI/INCT-EI, Fortaleza, Ceará, Brasil**. 2015. p. 1817-1825.

RODRIGUES, L. N.; SILVA, L. M. C.; FREITAS, M. A. S. Reservação: Planejamento e gerenciamento da água com vistas à redução de conflitos. **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, v. 100, p. 34–38, 2014.

RODRIGUES, L.N. Quantidade de água utilizada na agricultura irrigada: certezas e incertezas nas estimativas. **ITEM. Irrigação & Tecnologia Moderna**, v.114, p. 47-53, 2017.

RODRIGUES, L.N.; SANO, E.E.; STEENHUIS, T.S.; PASSO, D.P. 2012 Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian Savannah Region. **Water resources management**, v. 26, p. 873-882, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9941-8>

RUTHES, J.M. **A curva de permanência e a disponibilidade hídrica para outorga no Estado do Paraná**. 62p., 2017. Dissertation (Master's), Universidade Federal do Oeste do Paraná, Campus Cascavel.

SALAZAR, A.; BALDI, G.; HIROTA, M.; SYKTUS, J.; MCALPINE, C. Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review. **Global and Planetary Change**, v. 128, p. 103-119, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.009>.

SALIS, H. H. C.; EVANGELISTA, L. P.; COSTA, A. M.; HORTA, I. D. M. F. Diagnóstico da Disponibilidade Hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Manso-MG. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 64, p. 91-102, 2017. <https://doi.org/10.14393/RCG>

SALVIANO, M.F.; GROppo, J.D.; PELLEGRINO, G.Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 64-73, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>.

SANO, E.E.; RODRIGUES, A.A.; MARTINS, E.S.; BETTIOL, G.M.; BUSTAMANTE, M.M.C.; BEZERRA, A.S.; COUTO JÚNIOR, A.F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.

SANTANA, N. C.; RODRIGUES, L. N. **O Bioma Cerrado**. In: RODRIGUES, L. N (Editor técnico). Agricultura irrigada no Cerrado: subsídios para o desenvolvimento sustentável. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023, p. 35-59.

SANTOS, E. F. N.; BARRETO, I. D. C.; BARBOSA, E. A. S.; CAMPOS, L.; SILVA, A. S. A. Contribuição de técnicas multivariadas a índices de seca na compreensão das otto-regiões da bacia do São Francisco. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e7210313118-e7210313118, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13118>

SANTOS, G.O.; MARTINS, G.R.; BLAT, N.R.; MENDONÇA, L.B. Disponibilidade hídrica e as anomalias climáticas no cultivo de soja e milho no Cerrado. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 10, n. 3, p. 214-222, 2022. <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v10n3.santos>.

SECKLER, D. W. Demanda e suprimento mundial de água, 1990 a 2025: cenários e questões. Vol. 19. **Iwmi**, 1998

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.

SERRANO, L.D.O.; RIBEIRO, R.B.; BORGES, A.C.; PRUSKI, F.F. Low-flow seasonality and effects on water availability throughout the river network. **Water Resources Management**, v. 34, p. 1289-1304, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02499-3>.

SILVA NETO, S. P.; MOREIRA, C. T.; SILVA, S. A. **Plantio da soja na época certa**. Embrapa, 2010. Disponível em:

<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/871639>. Acesso em 16 de julho de 2023.

SILVA, B.M.B.; SILVA, D.D.; MOREIRA, M.C. Influence of the seasonality of stream flows on water use rights criteria: a case study of the Paraopeba river basin. **Ambiente e Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, p. 623-634, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1587>.

SILVA, D. S.; ARIMA, E. Y.; REIS, T. N.; RATTIS, L. Temperature effect on Brazilian soybean yields, and farmers' responses. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 21, n. 1, p. 2173370, 2023. <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2173370>

SINJ-DF – Sistema integrado de normas jurídicas do DF 2017 **Resolução N° 17**, de 15 de agosto de 2017. [http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/b3b525cc84254d78bcca719d4e08f934/adasa\\_res\\_17\\_2017.html](http://www.sinj.df.gov.br/sinj/Norma/b3b525cc84254d78bcca719d4e08f934/adasa_res_17_2017.html). Acesso: 22 de agosto de 2021.

SIQUEIRA, P.P.; OLIVEIRA, P.T.S.; BRESSIANI, D.; MEIRA NETO, A.A.; RODRIGUES, D.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. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100931>

SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. **Journal of hydrology**, v. 240, n. 3-4, p. 147-186, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).

SOARES, A.K.; OHNUMA, A.A., JR.; BORGES, A.C.; PAGNOSSI, A.A.; ANGELOTTI NETTO, A.; CORRÊA FILHO, C.R.R.; MENDIONDO, E.M. Análise do balanço hídrico serial na bacia da represa do Broa, SP. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, v. 15, p. 1-17, 2003. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/154/285.pdf>. Acessado em 13 de janeiro de 2022.

SOUSA, F.A.; MOURA, D.M.B. Evapotranspiração potencial (ETp) e sua influência na vazão de rios do Cerrado Brasileiro. **Élisée Revista de Geografia da UEG**, v. 11, n. 1, e111222, 2022. <https://doi.org/10.31668/elisee.v11i1.12475>

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; SCHAFER, R.; GURSKI, B. C.; SCHAFER, H. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 2017.

SPERA, S. Agricultural Intensification Can Preserve the Brazilian Cerrado: Applying Lessons From Mato Grosso and Goiás to Brazil's Last Agricultural Frontier. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1940082917720662, 2017. <https://doi.org/10.1177/1940082917720662>

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

STRASSBURG, B.B.N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A.E.; OLIVEIRA FILHO, F.J.B.; SCARAMUZZA, C.A.M.; SCARANO, F.R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 4, p. 0099, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>

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. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.00054>

SULLIVAN, C. Calculating a water poverty index. **World development**, v. 30, n. 7, p. 1195-1210, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00035-9)

THOM, H. C. S. Some of methods of climatological analysis. **World Meteorological Organization**, p. 54p., 1966.

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2021**. O valor da água. 2021.

VANHAM, D.; HOEKSTRA, A. Y.; WADA, Y.; BOURAOUI, F.; ROO, A.; MEKONNEN, M. M.; 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, p. 218-232, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.056>

VARELLA, J. L.; QUADRELLI, G. Redes Neurais e análise de potência. **Revista de Tecnologia Aplicada**, v. 6, n. 3, 2017. <http://dx.doi.org/10.21714/2237-3713rta2017v6n3p33>

VEETIL, A. V.; MISHRA, A. K. Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using blue and green water scarcity, Falkenmark index, and freshwater provision indicator. **Journal of environmental management**, v. 228, p. 346-362, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.012>

VEIGA, L.B.E.; MAGRINI, A. The Brazilian water resources management policy: fifteen years of success and challenges. **Water Resources Management**, v. 27, p. 2287-2302, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0288-1>

VÖRÖSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R. B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. **science**, v. 289, n. 5477, p. 284-288, 2000. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>

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. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.012>