

Pegada hídrica do feijão irrigado para o Médio Norte do estado de Mato Grosso

Célio Jacinto da Silva¹ , Frederico Terra de Almeida^{2*} , Daniela Roberta Borella³ , Handrey Borges de Araújo⁴ , Adilson Pacheco de Souza⁵ , Rhavel Salviano Dias Paulista⁶ 

1 Pós-graduando do Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais – PPGCAM / ICNHS / UFMT.

2 Professor Titular do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – ICAA / UFMT – orientador no PPGCAM.

3 Bolsista Pós-Doc e Pesquisadora Colaboradora no PPGCAM / ICNHS / UFMT.

4 Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – ICAA – UFMT.

5 Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais – ICAA – UFMT.

6 Doutorando do Programa em Física Ambiental - IF - UFMT.

*Autor para correspondência: frederico.almeida@ufmt.br

Recebido em 6 de fevereiro de 2024.

Aceito em 15 de agosto de 2024.

Publicado em 13 de dezembro de 2024.

Resumo – O setor agrícola brasileiro é um segmento muito expressivo quanto à utilização dos recursos hídricos, principalmente no estado de Mato Grosso, mais precisamente na região de transição Cerrado-Amazônia, que abriga um dos maiores polos de irrigação do país. Visto que os recursos hídricos são finitos e sua utilização é intensiva, a quantificação do uso da água pela agricultura pode contribuir para a adoção de políticas públicas de gestão de recursos hídricos. Neste sentido, o objetivo do trabalho foi determinar experimentalmente a Pegada Hídrica do feijão de inverno irrigado para o Médio Norte do estado de Mato Grosso. Por meio dos dados climáticos obtidos no local do experimento e do uso software CROPWAT foi possível calcular a demanda evapotranspirométrica da cultura do feijão (Dama Carioca TAA S2) na região e realizar o balanço de irrigação nos anos de 2021 a 2023. As Pegadas Hídricas verde e azul foram obtidas utilizando a evapotranspiração da cultura para calcular a demanda hídrica com média de 2.381,0 m³.ha⁻¹, enquanto a Pegada Hídrica cinza foi calculada com base na taxa de aplicação de fertilizante nitrogenado nas culturas de 100 kg.ha⁻¹, e sua lixiviação no solo com média de 342,44 m³.t⁻¹, destacando a importância do controle adequado da aplicação de fertilizantes. Na área de estudo o feijão da variedade Dama Carioca TAA S2 foi cultivada apresentando uma boa produtividade média de 2.921,0 kg.ha⁻¹, superando as médias regionais e nacional. A média da Pegada Hídrica Total do feijão foi de 1.157,96 m³.t⁻¹, sendo 70,43% atribuídos à Pegada Hídrica Azul (815,52 m³.t⁻¹) e 29,57% atribuídos à Pegada Hídrica Cinza (342,44 m³.t⁻¹). A ausência de Pegada Hídrica Verde (0%) reflete a prática de plantio durante o período seco. Os resultados indicaram que a Pegada Hídrica se apresentou como um ótimo indicador do consumo de água para a produção de feijão da variedade Dama Carioca TAA S2 na região Médio Norte de Mato Grosso. Esses resultados têm implicações valiosas para a agricultura sustentável, enfatizando a importância do manejo consciente dos recursos hídricos para melhorar a produção agrícola, uma vez que o indicador de Pegada Hídrica contribui para discussões de potencialidades de plantio de culturas em determinadas regiões.

Palavras-chave: Pegada hídrica azul. CROPWAT. Ecótono Cerrado-Amazônia. Pivô Central. Grãos. Recursos Hídricos.

Bean irrigate Water footprint for the middle north of the State of Mato Grosso

Abstract – The Brazilian agricultural sector is a very significant segment in terms of water resource use, especially in the state of Mato Grosso, more precisely in the Cerrado-Amazon transition region, which is home to one of the largest water security hubs in the country. Since water resources are finite and their use is intensive, quantifying water use by agriculture can contribute to the adoption of public water resource management policies. In this sense, the objective of the study was to experimentally determine the Water Footprint of irrigated winter beans for the Mid-North of the state of Mato Grosso. Using climate data obtained at the experiment site and the CROPWAT software, it was possible to calculate the evapotranspiration demand of the bean crop (Dama Carioca TAA S2) in the region and perform the supervision balance for the years 2021 to 2023. The green and blue Water Footprints were obtained using crop evapotranspiration to calculate water demand with an average of 2,381.0 m³.ha⁻¹, while the gray Water Footprint was calculated based on the nitrogen fertilizer application rate in crops of 100 kg.ha⁻¹, and its leaching into the soil with an average of 342.44 m³.t⁻¹, highlighting the importance of adequate control of fertilizer application. In the study area, the Dama Carioca TAA S2 bean variety was cultivated, presenting a good average productivity of 2,921.0 kg.ha⁻¹, exceeding regional and national averages. The average Water Footprint for the total beans was 1,157.96 m³.t⁻¹, with 70.43% attributed to the Blue Water Footprint (815.52 m³.t⁻¹) and 29.57% attributed to the Gray Water Footprint (342.44 m³.t⁻¹). The absence of a Green Water Footprint (0%) reflects the practice of planting during the dry period. The results indicated that the Water Footprint was presented as an excellent indicator of water consumption for the production of beans of the Dama Carioca TAA S2 variety in the Mid-North region of Mato Grosso. These results have beneficial implications for sustainable agriculture, emphasizing the importance of conscious management of water resources to improve agricultural production, since the Water Footprint indicator contributes to the investigation of crop planting potential in certain regions.

Keywords: Blue water footprint. CROPWAT. Cerrado-Amazon Ecotone. Water Efficiency. Center Pivot. Grains. Water resources.

Huella hídrica del frijol de regadío para el medio norte del Estado de Mato Grosso

Resumen - El sector agrícola brasileño es un segmento muy significativo en términos de uso de recursos hídricos, principalmente en el estado de Mato Grosso, más precisamente en la región de transición Cerrado-Amazônia, que alberga uno de los mayores centros de seguridad del país. Dado que los recursos hídricos son finitos y su uso intensivo, cuantificar el uso del agua en la agricultura puede contribuir a la adopción de políticas públicas para la gestión de los recursos hídricos. En este sentido, el

objetivo del trabajo fue determinar experimentalmente la Huella Hídrica del frijol de invierno irrigado para el Medio Norte del estado de Mato Grosso. Utilizando los datos climáticos obtenidos en el sitio del experimento y el uso del software CROPWAT, se logró calcular la demanda evapotranspirométrica del cultivo de frijol (Dama Carioca TAA S2) en la región y realizar el balance de supervisión en los años 2021 a 2023. Las Huellas Hídricas verde y azul se obtuvieron mediante la evapotranspiración del cultivo para calcular la demanda hídrica con un promedio de 2.381,0 m³.ha⁻¹, mientras que la Huella Hídrica gris se calculó con base en la tasa de aplicación de fertilizante nitrogenado en cultivos de 100 kg.ha⁻¹, y su lixiviación al suelo con un promedio de 342,44 m³.t⁻¹, destacando la importancia de un adecuado control de la aplicación de fertilizantes. En el área de estudio se cultivó frijol de la variedad Dama Carioca TAA S2, presentando una buena productividad promedio de 2.921,0 kg.ha⁻¹, superando los promedios regionales y nacionales. La Huella Hídrica promedio El total de frijol fue de 1.157,96 m³.t⁻¹, siendo el 70,43% atribuido a la Huella Hídrica Azul (815,52 m³.t⁻¹) y el 29,57% a la Huella de Aguas Grises (342,44 m³.t⁻¹). La ausencia de Huella Hídrica Verde (0%) refleja la práctica de plantar durante el período seco. Los resultados indicaron que la Huella Hídrica se presentó como un excelente indicador del consumo de agua para la producción de frijol de la variedad Dama Carioca TAA S2 en la región Medio Norte de Mato Grosso. Estos resultados tienen implicaciones beneficiosas para la agricultura sostenible, enfatizando la importancia de una gestión consciente de los recursos hídricos para mejorar la producción agrícola, ya que el indicador de Huella Hídrica contribuye a la investigación del potencial de siembra de cultivos en ciertas regiones.

Palabras llave: Huella hídrica azul. CROPWAT. Ecotono Cerrado-Amazónico. Pivote central. Granos. Recursos hídricos.

Introdução

O Brasil atualmente é o terceiro maior produtor de feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) do mundo, com uma safra 2020/21 de 2,89 milhões de toneladas, safra 2021/22 de 2,99 milhões de toneladas, safra 2022/23 de 3,04 milhões de toneladas, representando um aumento de 5,11% nesse período. O estado de Mato Grosso é o quinto maior produtor de feijão do país, atualmente com um montante de 358,70, 255,30 e 307,10 mil toneladas nas safras 2020/21, 2021/22 e 2022/23, respectivamente, ou seja, houve uma redução de 14,38% no mesmo período (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2023).

No estado de Mato Grosso, a área cultivada com feijão chegou a 255.600 ha na safra 2020/21, no entanto, na safra 2022/23 essa área reduziu para cerca de 154.300 ha, uma redução de 39,63% em dois anos (CONAB, 2023). Mesmo com a diminuição da área cultivada no estado, a produção nacional aumentou, devido ao aumento da produtividade em média de 14,07%, que passou de 989,9 kg.ha⁻¹ na safra 2020/21 para 1.129,2 kg.ha⁻¹ na safra 2022/23. E, apesar da redução significativa de área de produção da cultura do feijão, sua produtividade no estado de Mato Grosso aumentou substancialmente, passando de 1.403,4 kg.ha⁻¹ para 1.990,2 kg.ha⁻¹, representando um aumento de 41,81% na produtividade no período considerado (CONAB, 2023). Este aumento da produtividade se deve, em parte, aos avanços tecnológicos nas lavouras, sobretudo, a irrigação. E ainda, o estado de Mato Grosso pode melhorar a produtividade da cultura do feijão, pois, apesar de atualmente ter

produtividade maior do que a média nacional (1.990,2 kg.ha⁻¹ na safra 2022/23 contra 1.129,2 kg.ha⁻¹ da safra nacional no mesmo período), sua produtividade é menor do que a média da Região Centro-Oeste, que foi de 2.275,7 kg.ha⁻¹ na safra 2022/23 (CONAB, 2023). Isso porque neste estado é mais comum o plantio do feijão “safrinha” (2ª safra) e do feijão irrigado (3ª safra) (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2022).

A diferença de produtividade se deve a diversos fatores, mas essencialmente podemos dizer que a demanda hídrica é o principal deles. Isto fica visível porque esta demanda para a cultura do feijão, como para qualquer outra cultura e/ou variedade e/ou cultivar, vai depender do clima e do solo da região de plantio e dos tratos culturais, bem como do manejo da irrigação. Exemplos disso são os estudos que estimam a demanda hídrica do feijão Carioca, com 373,4 mm para a região da área de transição Cerrado-Amazônia e de 415,9 mm para o bioma Cerrado, ambos os cultivos localizados no estado de Mato Grosso, e a produtividade do feijão nestas localidades sendo de 2.285,0 kg.ha⁻¹ (Rondon, 2023).

Sales *et al.* (2017) estudaram a aplicação de lâminas para as cultivares de feijão Majestoso e Valente em Colatina – ES, com lâminas variando de 103,8 a 319,7 mm para a primeira cultivar, e obtiveram produtividades variando de 1.589,6 a 2.703,5 kg.ha⁻¹ respectivamente. Para a cultivar Valente, com lâminas de 94,5 a 327,7 mm, obtiveram produtividades variando de 818,5 a 3.797,9 kg.ha⁻¹, respectivamente.

Costa *et al.* (2017) estudaram a aplicação de água por diferentes sistemas de irrigação na cultura do feijão carioca, e encontraram 437,0 mm de média de demanda, para uma produtividade média de 1979,4 kg.ha⁻¹. Enquanto Mantovani *et al.* (2012) estimaram diferentes lâminas de irrigação para o feijão carioca, em função da uniformidade do sistema de irrigação, obtendo com a maior uniformidade uma aplicação de 418,2 mm e uma produtividade de 2.946,5 kg.ha⁻¹, para seu ciclo, na região de Cristalina - GO.

Outros estudos buscaram estimar e/ou medir lâminas de demanda hídrica da cultura do feijão, com base na melhor estimativa dos coeficientes de cultivo para várias cultivares de feijão em diferentes localidades, em que Fischer Filho e Zocoler (2016) estimaram lâmina média de 393 mm, enquanto Mendonça *et al.* (2007) mediram a irrigação para o feijão comum uma lâmina de 263,5 mm, para a região de Campos, no Rio de Janeiro.

Com isso surge a preocupação pela demanda de água para o agronegócio na irrigação de culturas agrícolas em propriedades rurais. Dessa forma, a avaliação do uso da água, por meio de índices ou indicadores, expressa o conceito de eficiência e sustentabilidade conjuntamente.

Além disso, com o aumento do uso dos recursos hídricos houve a necessidade de sancionar leis de proteção ambiental, como a Lei nº. 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), tendo por objetivo ser um instrumento que orienta a gestão das águas no Brasil, subsidiando a gestão e planejamento, e definindo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos (Brasil, 2023).

Dentre as ideias de planejamento e gestão dos recursos hídricos, de acordo com Hoekstra *et al.* (2011), a Pegada Hídrica pode ser vista como uma métrica composta, que leva em consideração medidas tradicionais de apropriação, bem como a escassez de água, tornando-a um indicador da pressão antrópica sobre os recursos hídricos, pois considera a água que é utilizada na produção de bens e serviços numa bacia hidrográfica e que não pode ser vista, denominando-a de água virtual.

A Pegada Hídrica é fundamental para fornecer informações espaço-temporais do modo como a água é utilizada nas diversas atividades humanas, em que estas medidas podem refletir as variações locais de utilização, evaporação e impactos em relação aos recursos hídricos (Chapagain e Tickner,

2012). A Pegada Hídrica oferece, assim, uma visão melhor e mais ampla da relação do consumidor ou produtor com o uso da água potável, no entanto, esse termo não está relacionado ao grau de severidade do impacto ambiental local do consumo e poluição da água.

Estudos sobre a pegada hídrica do feijão tem sido realizado ao longo dos anos, mas com dados estimados de censos de produção e balanço hídrico da cultura, como o de Hoekstra e Hung (2002), encontrando Pegada Hídrica (PH) do feijão em $5.846 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Posteriormente, Mekonnen e Hoekstra (2011) estimaram a Pegada Hídrica para vários cultivos, e para o feijão teve um valor de com média global de $5.053 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, considerando Brasil, China, Índia, USA, Rússia, Canadá, Indonésia, Argentina e Paquistão.

No Brasil, nesta mesma linha de uso de base de dados estatísticos e planejamento do uso dos recursos hídricos, Rondon (2023) encontrou resultados estimados de PH para o feijão de $2.084 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ no Cerrado e $1.898 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ na transição Cerrado-Amazônia, no estado de Mato Grosso.

Mundialmente outros estudos foram feitos, como o efetuado por Quispe_Quezada, U. R. *et al.* (2023), que teve como objetivo determinar e relacionar a pegada hídrica, a produtividade econômica da água e a ecoeficiência agrícola de 15 culturas na província de Chupaca - Peru. Também estudos realizados em regiões no hemisfério norte, como o de X. Liu *et al.* (2024) que realizaram avaliação da eficiência dos recursos hídricos da produção agrícola em regiões áridas e semiáridas (noroeste da China) com base na pegada hídrica e vantagem comparativa, encontraram diferenças na pegada hídrica de diversas culturas (trigo, arroz, soja, milho, batata, vegetais, algodão, óleo e frutas) e na produção de safras entre as regiões levaram a diferentes vantagens comparativas para diferentes safras em diferentes regiões.

Importante destacar que estudos de campo, com uso da irrigação tem sido realizado na busca de avaliar também estes indicadores de pegada hídrica, como: Mantovani *et al.* (2012) com estudos de lâminas de irrigação para o feijão carioca na região de Cristalina – GO; Costa *et al.* (2017) com estudos de diferentes sistemas de irrigação na cultura do feijão, no estado da Bahia; Sales *et al.* (2017) estudaram a aplicação de lâminas e a pegada hídrica para as cultivares de feijão majestoso e valente em Colatina – ES; Santos, Oliveira e Madi (2023) estudando a Pegada Hídrica do feijão em Sergipe, de 2017 a 2020, dentre outros.

E por fim, vale destacar o estudo realizado por Heimenan *et al.* (2021), que utilizaram as duas situações citadas para avaliar a pegada hídrica (WF) da produção de algodão e feijão-mungo irrigados pelo Center Pivot (CP) no norte da Etiópia, usando duas abordagens, a saber, CROPWAT e métodos baseados em dados de campo.

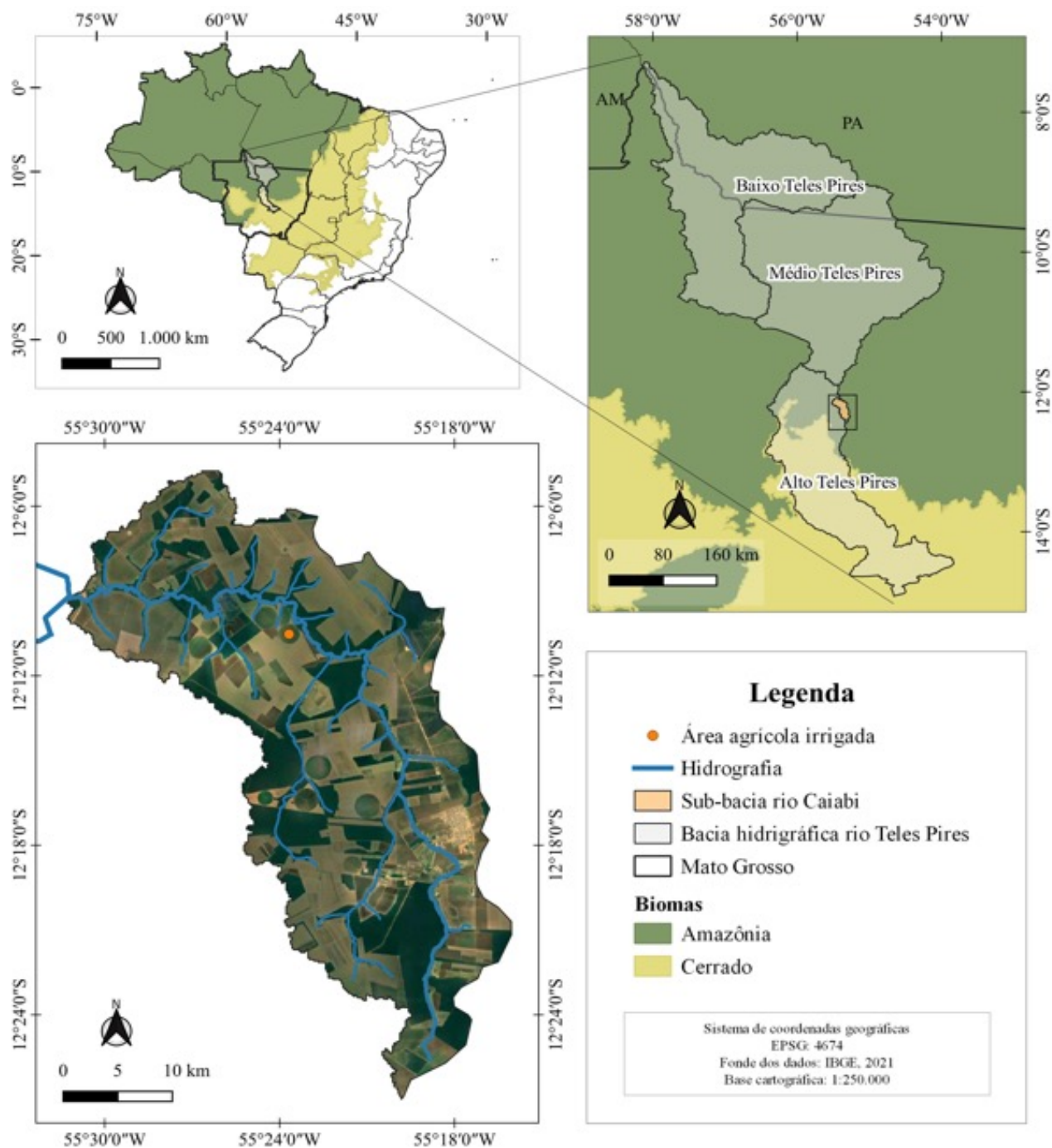
Diante da relevância das informações apresentadas, o objetivo deste estudo foi determinar e avaliar a Pegada Hídrica da cultura do feijão sob a condição de irrigação, na região do Médio Norte Matogrossense.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área agrícola irrigada pertencente a Fazenda São José, localizada no município de Sinop, Mato Grosso, Brasil. A área de estudo está inserida dentro dos limites da sub-bacia hidrográfica do rio Caiabi, afluente do rio Teles Pires (Figura 1).

Figura 1. Localização da área de estudo com o cultivo de feijão inserida na sub-bacia hidrográfica do rio Caiabi, na região do Ecótono Cerrado-Amazônia, Mato Grosso, Brasil.

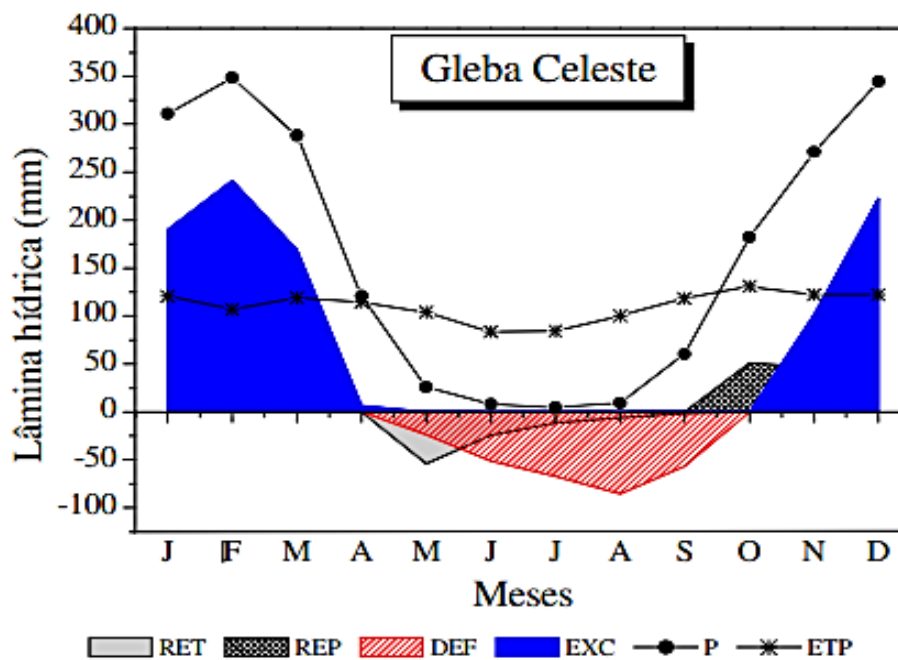


Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

O solo da região de estudo é, em sua maioria, de Latossolos, variando do Vermelho a Vermelho-Amarelo, todos distróficos, com características que respondem bem à fertilização para as culturas tropicais, além disso, em áreas baixas da região há a presença de Plintossolos (Alves *et al.*, 2022). A vegetação natural é composta por formações savânicas e florestais (Ecótono Cerrado-Amazônia) que ocupa cerca de 30%, e os principais usos estão concentrados na agricultura com 60,00% e pecuária 8,19%.

O clima da região Médio Norte do estado de Mato Grosso, segundo a classificação de Köppen é o tipo Aw (tropical quente e úmido), com duas estações hídricas bem definidas: chuvosa (outubro a abril) e seca (maio a setembro) (Figura 2). As temperaturas médias mensais variam de 24 e 27°C. A precipitação média anual é de 1.970 mm, concentrando mais de 1.700 mm na estação chuvosa, a evapotranspiração de referência oscila de 84 a 131 mm mês⁻¹, entre os períodos chuvoso e seco da região, respectivamente (Souza et al., 2013).

Figura 2. Representação gráfica completa do balanço hídrico climatológico para a estação meteorológica convencional “Gleba Celeste” no período de 1971-2010, na região Norte do estado de Mato Grosso.

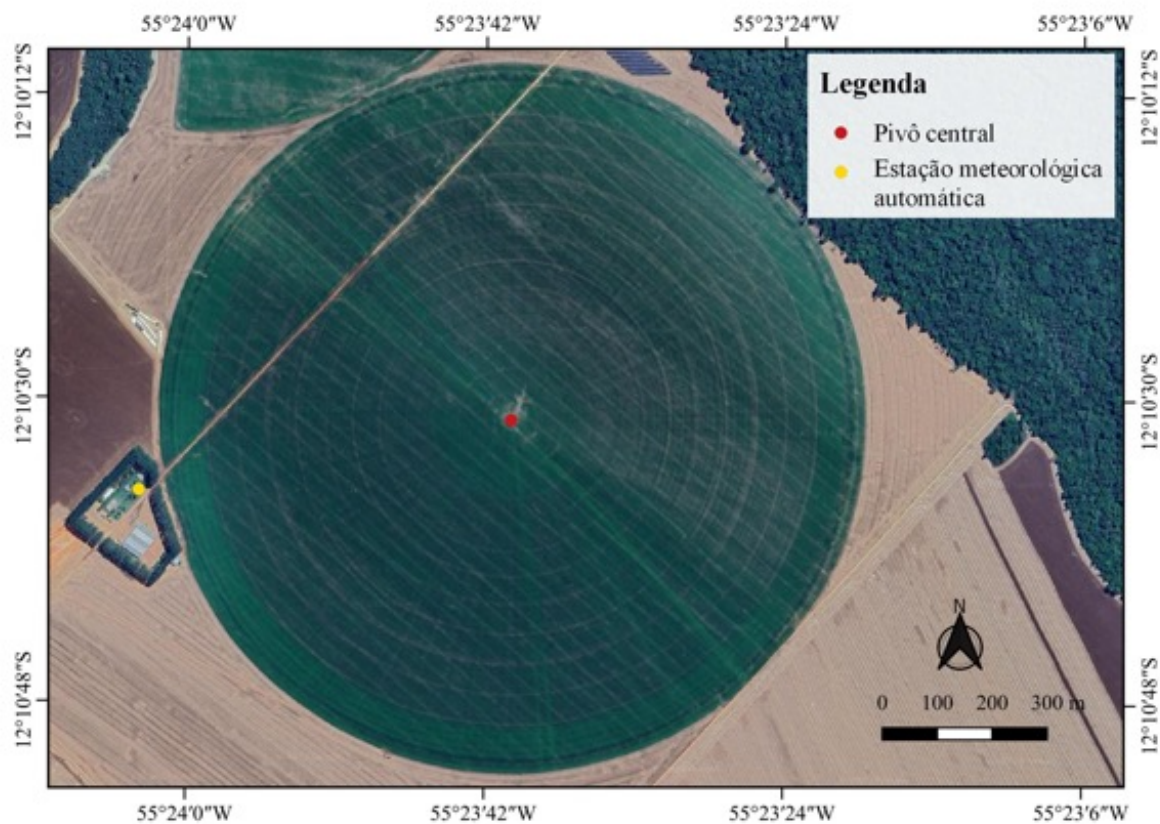


Fonte: Souza et al., 2013.

Cultura e dados do feijão irrigado

O cultivo do feijão de inverno da variedade Dama Carioca TAA S2 foi conduzido em uma área de 130 hectares irrigada por pivô central (pivô central 01 da Fazenda) com giro de 360° (latitude de -12,175408° e longitude de -55,394594° e altitude de 377 m) (Figura 3). A coleta dos dados da lâmina de irrigação, bem como dos tratamentos culturais (adubação nitrogenada, dentre outras) e produção por área, foi feita em três períodos durante a estação seca da região nos anos de 2021, 2022 e 2023.

Figura 3. Área agrícola irrigada (pivô central 01) com o cultivo do feijão de inverno da variedade Dama Carioca TAA S2 pertencente a Fazenda São José, localizada no município de Sinop, Mato Grosso, Brasil.



Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Cálculos das demandas

Para os cálculos da Pegada Hídrica foi utilizado o software CROPWAT 8.0, que é de domínio público e foi desenvolvido e disponibilizado pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*). Os cálculos realizados por este software são baseados na publicação “*Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*” (Allen *et al.*, 1998).

Utilizou-se dados climáticos obtidos na região de estudo e da cultura e manejo com o produtor rural, para realizar o cálculo das variáveis: evapotranspiração de referência (ET_0) calculado pela equação de Penman-Monteith, evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração ajustada (ET_a), coeficiente de estresse hídrico (K_s), Necessidade Hídrica da Cultura (NHC), necessidade líquida de irrigação (NIR) e cronograma de irrigação. Como dados de entrada o modelo necessita dos dados climáticos do local de avaliação, sendo eles temperatura do ar mínima e máxima ($^{\circ}C$), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento ($km.h^{-1}$), horas de insolação (h), dados pluviométricos (mm) e precipitação efetiva (mm).

Após a determinação da necessidade hídrica e da obtenção dos dados de produção da cultura, calculou-se as pegadas hídricas.

Monitoramento meteorológico

Durante o período experimental deste trabalho, as variáveis meteorológicas foram coletadas por uma estação meteorológica automática completa HOBO OnSet RX3000 com sistema de telemetria e armazenamento dos dados a cada 10 minutos. Essa estação fica localizada a 500 m da área irrigada. Algumas datas com falhas de dados foram preenchidas com os dados meteorológicos registrados pelo Sistema de Monitoramento Agrometeorológico da Embrapa Agricultura Digital a partir da estação meteorológica TRMM 4225 localizada nas coordenadas latitude -12,25° e longitude -55,50° e altitude de 386 m, distante a cerca de 13 km da área irrigada de estudo, com medidas armazenadas a cada 10 minutos de temperatura do ar e precipitação (Sistema de Monitoramento Agrometeorológico - Agritempo, 2023).

Quanto as falhas de dados, para obtenção da radiação global incidente empregou-se a metodologia dos coeficientes de Bristow e Campbell (1984), com os coeficientes calibrados regionalmente, conforme recomendações de Souza *et al.* (2017). A razão de insolação foi obtida a partir da equação de Angstrom-Prescott, com os coeficientes lineares (a) e angulares (b) calibrados regionalmente na escala sazonal, conforme recomendações de Martim e Souza (2021). A umidade relativa do ar foi obtida a partir da equação psicrométrica, com base na temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido.

Balanço hídrico da cultura

A evapotranspiração de referência (ET_0) diária foi obtida pelo método de Penman-Monteith proposta pela FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) (Eq. 01).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_m + 273,15} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Em que:

ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹);

Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor no ponto de T_m (kPa.°C⁻¹);

R_n é o saldo de radiação (MJ.m⁻².dia⁻¹);

G é o fluxo de calor no solo (MJ.m⁻².dia⁻¹);

γ é o coeficiente psicrométrico (0,063 kPa.°C⁻¹);

T_m é a temperatura do ar média diária (°C);

U_2 é a velocidade do vento média diária a 2,00 m de altura (m.s⁻¹);

e_s é a pressão de saturação do vapor médio diária (kPa);

e_a é a pressão parcial de vapor médio diária (kPa).

A evapotranspiração da cultura do feijão (ET_c) foi determinada pelo produto entre a evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith e os coeficientes de cultivo inicial (0,4), médio (1,15) e final (0,35) listados pelo boletim da FAO-56 (Eq. 02).

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (2)$$

Em que:

ET_c – a evapotranspiração da cultura (mm.dia⁻¹);

K_c – coeficiente de cultivo;

ET₀ – a evapotranspiração de referência (mm.dia⁻¹).

As fases fenológicas da cultura do feijão foram ajustadas conforme o ciclo de cada ano avaliado, com base no ciclo médio descrito pela FAO-56 (Allen *et al.*,1998) (Tabela 1).

Tabela 1. Fases fenológicas e coeficiente de cultivo da cultura do feijão segundo a FAO 56.

Fases da cultura	Dias	Coeficiente de cultivo (Kc)
Fase inicial	15	0,4
Fase desenvolvimento	25	1,15
Fase intermediária	35	1,15
Fase final	20	0,35
Ciclo	95	-

Fonte: Adaptado de Allen *et al.* (1998).

Para determinar a demanda hídrica da cultura potencial utilizou-se o sistema CROPWAT 8.0, esse software necessita, além de dados meteorológicos e da cultura, que sejam inseridos também os dados de solo para estimar o coeficiente de estresse hídrico (K_s) e, em seguida fazer o ajuste da evapotranspiração. A Equação 03 expressa o cálculo da evapotranspiração ajustada (ET_a).

$$ET_a = K_s * ET_c \quad (3)$$

Em que:

ET_a – a evapotranspiração ajustada, (mm.dia⁻¹);

K_s – coeficiente de estresse hídrico;

ET_c – a evapotranspiração da cultura, (mm.dia⁻¹).

O parâmetro K_s, por sua vez, depende das seguintes variáveis: da água total disponível, da depleção estimada com o balanço hídrico do solo e da água que pode ser facilmente aproveitável pela cultura (AFA). Quando o consumo de água da planta ocorre no limite da água que pode ser facilmente aproveitável, o K_s é igual a 1, mas se a planta consumir uma taxa de água maior que a reposição de água facilmente aproveitável, o K_s será menor que 1.

Os cálculos realizados foram efetivados utilizando a irrigação automática no CROPWAT, em que o sistema acaba gerando as lâminas de irrigação nas datas em que a AFA está próxima do estresse hídrico e, com isso, os resultados de K_s acabam sendo iguais a 1 durante todo o ciclo da planta.

Pegada hídrica

Para a cultura do feijão, o cálculo da Pegada Hídrica é realizado pela determinação da evapotranspiração da cultura com o uso da água da chuva (verde), e da água de mananciais (azul) e

de lixiviação (cinza) para, posteriormente, a necessidade hídrica de cada “cor” e, por fim, a Pegada Hídrica verde, azul e cinza conforme descrito a seguir (Hoekstra e Chapagain, 2007).

A evapotranspiração verde (ETverde) foi calculada como o mínimo entre os valores da evapotranspiração total da cultura (ETc) e a precipitação efetiva total (Peff)(Eq. 04). A evapotranspiração azul (ETazul) foi calculada pelo máximo entre os valores zero e a diferença entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e a precipitação efetiva (Peff) (Eq. 05). Assim, quando a precipitação efetiva é maior que a evapotranspiração da cultura, a ETazul é igual a zero. Já quando a precipitação efetiva é zero, a ETazul é igual à ETc (Hoekstra *et al.*, 2011).

$$ETverde = \min(ETc; Peff) \quad (4)$$

$$ETazul = \max(0; [ETc - Peff]) \quad (5)$$

As componentes verde () e azul () da Necessidade Hídrica da Cultura (NHC, m³.ha⁻¹) foram calculadas com base na evapotranspiração diária (ETverde e ETazul, respectivamente, mm.dia⁻¹), acumulada durante o ciclo completo de desenvolvimento da cultura, conforme as Equações 06 e 07 (Hoekstra *et al.*, 2011):

$$NHCverde = 10 * \sum_{d=1}^{d=L} ETverde \quad (6)$$

$$NHCazul = 10 * \sum_{d=1}^{d=L} ETazul \quad (7)$$

O fator 10 objetiva converter a profundidade da água (mm) em volume de água por superfície terrestre (m³.ha⁻¹). O somatório é feito ao longo do período, desde o dia do plantio (d=1) até o dia da colheita (d=L) (L - duração do período de desenvolvimento da cultura, que é expressa, em dias).

A Pegada Hídrica verde é a água da chuva que fica armazenada nas folhas das plantas e no solo, que é facilmente aproveitada e quantifica a evapotranspiração verde (ETverde). É dada pelo mínimo entre os valores da evapotranspiração da cultura (ETc) e da precipitação efetiva (Peff). Enquanto a Pegada Hídrica azul determina a quantidade de água de mananciais superficiais e subterrâneos utilizada no atendimento à demanda hídrica da cultura na produção, principalmente na época da seca quando se tem baixos volumes de chuva. O valor da Pegada Hídrica azul (PHazul, m³.t⁻¹) que é dado pela Necessidade Hídrica azul da Cultura (NHCazul, m³.ha⁻¹), tem na evapotranspiração azul (ETazul) o valor máximo entre os valores zero e a diferença entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e a precipitação efetiva (Peff), sendo tanto maior quanto mais seco for o clima da região ou o período de cultivo utilizado. Assim, as componentes verde (PHverde) e azul (PHazul) da Pegada Hídrica da cultura foram calculadas pelas Equações 08 e 09 (Hoekstra *et al.*, 2011):

$$PHverde = \frac{NHCverde}{P} \quad (8)$$

$$PHazul = \frac{NHCazul}{P} \quad (9)$$

Em que:

PHverde – Pegada Hídrica verde da cultura ($m^3.t^{-1}$);

PHazul – Pegada Hídrica azul da cultura ($m^3.t^{-1}$);

NHCverde - Necessidade Hídrica verde da Cultura ($m^3.ha^{-1}$);

NHCazul - Necessidade Hídrica azul da Cultura ($m^3.ha^{-1}$);

P - Produtividade da cultura ($t.ha^{-1}$).

A Pegada Hídrica cinza é a água utilizada para diluir poluentes, e na agricultura é calculada considerando produção de grãos, quantidade de produto químico aplicado por hectare e taxa de lixiviação do produto químico. Com isso é estimada a quantidade de água necessária para diluir o poluente, sendo que as concentrações máxima e natural de um poluente em um rio são parâmetros para o cálculo da Pegada Hídrica cinza (Hoekstra *et al.*, 2011).

Atribuiu-se o valor de 10% para a fração de lixiviação, recomendado por Chapagain *et al.* (2006). O valor limite aceitável dos fertilizantes nitrogenados seguiu o padrão da legislação para águas doces que é de $10 mg.L^{-1}$ (CONAMA, 2005). A Pegada Hídrica cinza é, portanto, um indicador do grau de poluição da água doce, calculada em função da carga de poluente e da produtividade da cultura, calculada de acordo com a Equação 10 (Hoekstra *et al.*, 2011):

$$PH_{cinza} = \frac{CP}{\frac{C_{max} - C_{nat}}{P}} \quad (10)$$

Em que:

PHcinza – Pegada Hídrica cinza da cultura ($m^3.t^{-1}$);

CP - Carga de Poluentes que entra no sistema ($kg.ha^{-1}$) (taxa de lixiviação, considerada como 10% da taxa de fertilizante aplicado à cultura (Chapagain *et al.*, 2006);

C_{max} - Concentração máxima aceitável de poluentes no sistema ($kg.m^{-3}$)

C_{nat} - Concentração natural em um corpo de água ($kg.m^{-3}$);

P - Produtividade da cultura ($t.ha^{-1}$).

Considerou-se o valor 0 (zero) para a concentração natural do poluente no corpo hídrico (C_{nat}), pois nesse estudo não houve avaliação, análise e espacialização de corpos hídricos ao entorno das áreas agrícolas. Caso a concentração natural do corpo hídrico fosse conhecida, sendo ela maior que 0 (zero), o valor da Pegada Hídrica cinza seria maior do que o encontrado.

Resultados e Discussão

A variedade de feijão cultivada foi a Dama Carioca TAA S2, também conhecida como feijão de inverno, o início do plantio ocorreu no final do mês de maio e o início da colheita no final de agosto, com média de 92 dias de ciclo nas safras dos anos de 2021, 2022 e 2023 (Tabela 3). A taxa de aplicação (TAQ) de nitrogênio (N) fornecida pela administração da Fazenda São José e utilizada para calcular a Pegada Hídrica cinza foi de $100 kg.ha^{-1}$. A produção do feijão de inverno cultivado em pivô central praticamente não variou no período avaliado, obtendo média de 379.728,0 toneladas e produtividade de $2.921,0 kg.ha^{-1}$ (Tabela 2).

Tabela 2. Informações gerais da cultura do feijão irrigado por pivô central em uma área de 130 hectares pertencente a Fazenda São José, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

Ano	Variedade	Início do plantio	Início da colheita	Ciclo (dias)	TAQ N (kg.ha ⁻¹)	Produção (t)	Produtividade (kg.ha ⁻¹)
2021	Dama Carioca (TAA S2)	29/05/2021	29/08/2021	93		379.728,0	2.921,0
2022		24/05/2022	22/08/2022	91	100	382.376,0	2.941,4
2023		30/05/2023	28/08/2023	91		377.080,0	2.900,6
média		-		92		379.728,0	2.921,0

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

A produtividade média da cultura do feijão irrigado na região Médio Norte do estado de Mato Grosso (2.921,0 kg.ha⁻¹) superou em 176,9% a produtividade média nacional (1.055,0 kg.ha⁻¹), sendo 74,7% maior do que a média da produtividade do próprio estado do Mato Grosso (1.672,2 kg.ha⁻¹) e 43,7% maior do que a média da produtividade da região Centro-Oeste (2.032,9 kg.ha⁻¹) para o mesmo período. A média de produtividade de feijão na área estudada, para os últimos três anos, na verdade, supera a média de produtividade de qualquer estado da Federação Brasileira para o mesmo período, conforme dados da CONAB (2023), isto provavelmente devido ao cultivo irrigado. E, de fato, as maiores médias de produtividade, por estado, considerando o mesmo período, são Distrito Federal (2.729,8 kg.ha⁻¹), Goiás (2.561,4 kg.ha⁻¹), seguidos por São Paulo (2.294,0 kg.ha⁻¹), Santa Catarina (1.706,6 kg.ha⁻¹) e o próprio estado de Mato Grosso (1.672,2 kg.ha⁻¹) (CONAB, 2023).

Com o acompanhamento da safra de feijão irrigado também foram monitorados os dados meteorológicos e calculada a demanda evapotranspirométrica (ETc e ETa) e a Necessidade Hídrica da Cultura, para determinar os diferentes componentes da Pegada Hídrica da cultura do feijão de cada safra. Como o ciclo completo da produção de feijão de inverno acontece durante o período seco da região, a precipitação é nula, ou seja, igual a 0 mm para os três anos da pesquisa (Tabela 3).

Tabela 3. Dados de precipitação, demandas de evapotranspiração da cultura (ETc), do índice de disponibilidade de água no solo (Ks), da evapotranspiração ajustada (ETa) e da Necessidade Hídrica da Cultura (NHC) no ciclo da cultura do feijão irrigado no Médio Norte do estado de Mato Grosso, safras de 2021 a 2023.

Safra	Precipitação no ciclo (Peff) (mm)	ETc (mm)	Ks (taxa)	ETa (mm)	NHC (m ³ .ha ⁻¹)
2021		239,3		239,3	2.393,0
2022	0	226,7	1	226,7	2.267,0
2023		248,3		248,3	2.483,0
Média	0	238,1	1	238,1	2.381,0

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Os resultados das evapotranspirações (ETc e ETa) e da Necessidade Hídrica da Cultura (NHC) foram calculados pelo CROPWAT, com base nos dados meteorológicos da região de estudo, e totalizando a evapotranspiração diária da cultura (ETc) por ciclo de cada safra, bem como o resultado da evapotranspiração acumulada ajustada da referida cultura. A NHC do feijão encontrada no presente

estudo foi em média de 2.381,0 m³.ha⁻¹, esse resultado foi menor que o encontrado por outros trabalhos (Rondon, 2023; Santos, Oliveira e Madi, 2023; Costa *et al.*, 2017; Mantovani *et al.*, 2012; Mekonnen e Hoekstra, 2011; Hoekstra e Hung, 2002) e maior que outros estudos, como o de Sales *et al.* (2017).

Fischer Filho e Zocoler (2016) estimaram necessidade hídrica de 3.930,0 m³.ha⁻¹ para a cultura do feijão em Ilha Solteira, São Paulo, enquanto Mendonça *et al.* (2007) encontraram para o feijão comum uma demanda de 2.635,0 m³.ha⁻¹, na região de Campos dos Goytacazes, no Rio de Janeiro. Costa *et al.* (2017) também estudando a aplicação de água por irrigação na cultura do feijão, encontraram 4.370,0 m³.ha⁻¹ de demanda para os Tabuleiros Costeiros de Alagoas, em Alagoas. Enquanto Sales *et al.* (2017) estudaram a aplicação de lâminas para as cultivares de feijão Majestoso e Valente em Colatina, no Espírito Santo, encontraram lâminas hídricas variando de 1.038,0 a 3.197,0 m³.ha⁻¹, para a primeira cultivar e de lâminas entre 945,0 e 3.277,0 m³.ha⁻¹.

Observou-se que o valor da taxa de estresse hídrico (Ks), necessário para calcular a evapotranspiração ajustada, foi sempre igual a 1, uma vez que, quando o consumo de água da planta é menor ou igual a água que pode ser facilmente aproveitável pela cultura, o Ks é igual a 1. Isso foi verificado no cultivo de feijão avaliado no presente estudo, porque a irrigação tinha turno de rega de 2 dias e a aplicação de lâmina foi correspondente a evapotranspiração da cultura acumulada (ETc acumulada), sendo considerado a irrigação com lâmina 100% da ETc.

Na Tabela 4 pode-se verificar os valores da Pegada Hídrica Total, que é dada pela soma das Pegadas Hídricas azul, verde e cinza, em cada ano avaliado. O valor médio das Pegadas Hídricas azul, verde e cinza calculadas, correspondem, respectivamente, a 70,43%, 0,0% e 29,57% da Pegada Hídrica Total média encontrada neste trabalho, que foi de 1.157,96 m³.t⁻¹, valor bem abaixo do encontrado na literatura.

Tabela 4. Pegada hídrica (azul, verde, cinza e total) do feijão irrigado por pivô central em uma área de 130 hectares pertencente a Fazenda São José, Sinop, Mato Grosso, Brasil.

Safra	PHazul (m ³ .t ⁻¹)	PHverde (m ³ .t ⁻¹)	PHcinza (m ³ .t ⁻¹)	PH (Total) (m ³ .t ⁻¹)
2021	819,52	0	342,47	1.161,99
2022	770,83	0	340,02	1.110,85
2023	856,21	0	344,83	1.201,03
Média	815,52	0	342,44	1157,96
(%)	(70,43%)	(0,00%)	(29,57%)	(100,00%)

Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Hoekstra e Hung (2002), por exemplo, estimaram a Pegada Hídrica (PH) do feijão em 5.846 m³.t⁻¹, considerando uma produtividade do feijão de apenas 0,7 t.ha⁻¹, valor este que era uma média do Brasil no ano de 1999, e que demonstra, devido a questão da produtividade, que a Pegada Hídrica apresenta baixa eficiência do uso da água. Posteriormente, Mekonnen e Hoekstra (2011) estimaram a Pegada Hídrica Total média para alguns cultivos, e os valores para o feijão resultaram em uma média global de 5.053 m³.t⁻¹, considerando Brasil, China, Índia, USA, Rússia, Canadá, Indonésia, Argentina e Paquistão.

Rondon (2023), por sua vez, encontrou resultados estimados de PH para o feijão de $2.084 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ no Cerrado e $1.898 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ na transição Cerrado-Amazônia, no estado de Mato Grosso, resultados acima do encontrado no presente trabalho, o que sugere melhor análise dos dados e cálculos estimativos, buscando explicações que demonstrem o porquê da diferença, visto que este estudo e o de Rondon (2023) foram realizados para regiões bem próximas, diferenciando que o presente estudo foi realizado em campo.

Na mesma pesquisa, Rondon (2023) também estimou os valores da PH para as culturas de soja e milho, encontrando $1.486 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ no Cerrado e $1.476 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ na transição Cerrado-Amazônia para a soja, e $1.016 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ no Cerrado e $1.052 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ na transição Cerrado-Amazônia para o milho. Costa *et al.* (2021), em estudo realizado na região Oeste da Bahia, para o período de 2012 a 2017, encontraram Pegada Hídrica Total média de $1.993,2 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ para a soja (produtividade média da BA de $2,81 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ no período (CONAB, 2023) e de $654,3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ para o milho (produtividade média da BA de $3,29 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ no período (CONAB, 2023).

Em outros estudos, Sales *et al.* (2017) estudaram a aplicação de lâminas para as cultivares de feijão majestoso e valente em Colatina – ES, obtendo PH (verde e azul) mínima de $653,0 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ e máxima de $1.182,5 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ para a cultivar majestoso. Enquanto para a cultivar valente, a PH foi de $115,4$ a $863,0 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Costa *et al.* (2017) com estudos de diferentes sistemas de irrigação na cultura do feijão, encontraram $437,0 \text{ mm}$ de média de demanda, uma produtividade média de $1.979,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, obtendo uma PH de $2.207,7 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. Mantovani *et al.* (2012), em estudos de lâminas de irrigação para o feijão carioca, obtiveram as maiores pegadas hídricas (PH) de $1.419,3 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, na região de Cristalina - GO. Santos, Oliveira e Madi (2023) estudando a Pegada Hídrica do feijão em Sergipe, de 2017 a 2020, obtiveram Pegada Hídrica (verde e azul) de $2.982,6 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$.

Tanto os resultados encontrados neste trabalho como os de outros autores citados, que estudaram a cultura do feijão ou outra cultura, e também a observância em locais diferentes e /ou sob condições de manejo da cultura diferente, mas não facilmente mensuráveis, chama a atenção que os índices de pegada hídrica precisam de melhor parametrização ou estudos mais aprofundados, que permitam o uso destas métricas para um verdadeiro planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Neste aspecto, estudos realizados por X. Liu *et al.* (2024), em regiões no hemisfério norte, avaliaram a eficiência dos recursos hídricos da produção agrícola em regiões áridas e semiáridas (noroeste da China) com base na pegada hídrica e vantagem comparativa, e encontraram diferenças na pegada hídrica de diversas culturas (trigo, arroz, soja, milho, batata, vegetais, algodão, óleo e frutas) e na produção de safras entre as regiões, indicando a obtenção de diferentes vantagens comparativas para diferentes safras em diferentes regiões.

Nesta temática, Heimenan *et al.* (2021) estudando a pegada hídrica da produção de algodão e feijão-mungo irrigados por pivô central no norte da Etiópia, e usando duas abordagens, a saber, CROPWAT e métodos baseados em dados de campo, obtiveram resultados que mostram a comparação do PH azul do CROPWAT e estimativas baseadas em dados de campo mostrou uma boa concordância estatística, e nenhuma diferença significativa foi obtida entre as duas estimativas. E com base nas estimativas baseadas no CROPWAT, a PH total média do algodão foi de $2.745 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ (PH verde e azul contribuíram para uma média de 35% e 5%, respectivamente). E para o feijão-mungo, a PH total foi de $6.561 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, da qual a PH azul cobriu cerca de 93%.

Continuando nesta linha de pensamento, os resultados encontrados para três culturas em duas regiões estudadas por Rondon (2023) indicaram, segundo a pesquisadora, que quanto maior a

produtividade mais eficiente será a PH, como no caso do milho (produtividade média de 6,03 t.ha⁻¹, em ambos os biomas estudados), que é altamente produtivo e não utiliza tanta água, ao contrário do feijão irrigado (produtividade média de 2,28 t.ha⁻¹, em ambos os biomas estudados), que possui baixa produtividade e utiliza um alto volume de água. A soja (produtividade média de 3,36 t.ha⁻¹, em ambos os biomas estudados), por sua vez, apesar de possuir uma alta Pegada Hídrica verde, consegue ter o consumo mais racional do que o feijão e tem o potencial de reduzir a Pegada Hídrica cinza quando não necessitar de adubação nitrogenada.

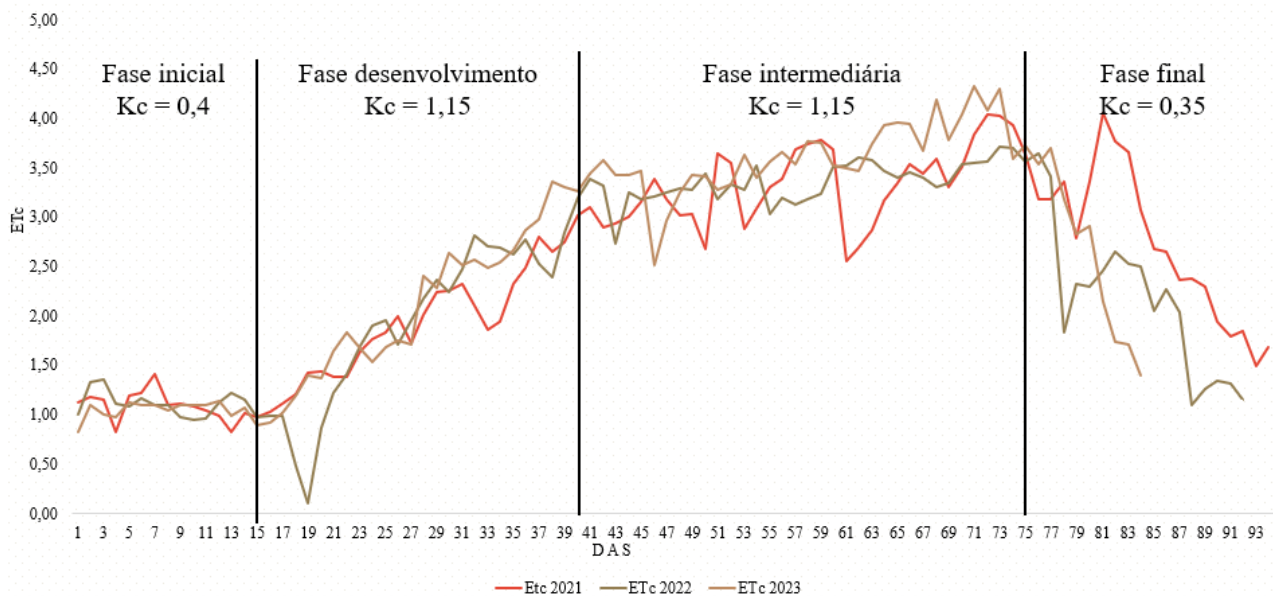
Ao comparar os resultados apresentados na presente pesquisa com os encontrados na literatura, observamos que, independentemente da cultura agrícola, quanto maior for a produtividade mais eficiente será a Pegada Hídrica da cultura. Isso fica evidente quando comparamos os dados de produtividade versus Pegada Hídrica das culturas de feijão, milho e soja apresentados por Rondon (2023) para cada uma das regiões de Cerrado e Cerrado-Amazônia. Fato semelhante podemos observar quando comparamos os dados de produtividade versus Pegada Hídrica da mesma cultura agrícola, neste caso, do feijão de inverno cultivado na mesma região de transição Cerrado-Amazônia e avaliado por Rondon (2023) e também no presente estudo.

No entanto, ao comparar resultados da literatura para a produtividade versus Pegada Hídrica da mesma cultura agrícola cultivada em regiões diferentes, observamos Pegada Hídrica distintas, pois muitos fatores influenciam na eficiência da PH em regiões diferentes, neste caso, maior produtividade não implica em maior eficiência da PH, e isso pode ser verificado por Rondon (2023) que encontrou PH de 1.016 m³.t⁻¹ no Cerrado e 1.052 m³.t⁻¹ na transição Cerrado-Amazônia para a cultura do milho, com produtividade média de 6,03 t.ha⁻¹ em ambas as regiões estudadas, enquanto Costa *et al.* (2021) encontraram PH de 654,3 m³.t⁻¹ para o milho na região Oeste da Bahia, com uma produtividade média de 3,29 t.ha⁻¹, conforme dados da CONAB (2023).

Pode-se inferir que a excelente produtividade de uma cultura agrícola, esteja associado ao fato dada cultura não ter passado por estresse hídrico (falta de água) em nenhuma fase do desenvolvimento, isto porque, as plantas são capazes de expressar o seu maior potencial produtivo quando não estão sob estresse hídrico durante seu ciclo de vida, ou seja, quando a evapotranspiração ajustada (ETa) é igual a evapotranspiração da cultura (ETc), fato que ocorreu no presente estudo. Todavia outros estudos demonstram que o não atendimento a demanda total de água (100% ETc) levam a menores produções e conseqüentemente, redução nas produtividades, ou seja, caso a oferta hídrica seja menor do que a demanda evapotranspirativa da planta em qualquer uma das fases fenológicas, ocorrerá déficit hídrico e, assim o rendimento da planta será menor do que o seu potencial, em função da quantidade de água que foi ofertada (Dos Santos *et al.*, 2022). Além disso, a irrigação de forma exclusiva é ajustada à evapotranspiração da cultura, suprimindo a necessidade e evitando o excesso de água disponível, que também pode ser prejudicial em algumas fases da cultura.

É fato de que a ETc depende do valor do coeficiente de cultivo (Kc), este por sua vez, altera conforme a fase de desenvolvimento da planta conforme visto na Tabela 2. Observamos que na fase inicial de desenvolvimento da planta (primeiros 15 dias) o consumo de água é menor, refletido num valor pequeno para a ETc, mas com o desenvolvimento da planta o consumo de água aumenta, refletido pelo aumento da ETc durante toda a fase de desenvolvimento (25 dias) e a fase intermediária (35 dias). Já na fase final de desenvolvimento, diminui a necessidade de água pela planta, como podemos observar pela diminuição da ETc durante esta última fase, que tem duração média de 20 dias (Figura 4).

Figura 4. Evapotranspiração da cultura (ETc) ao longo do ciclo da cultura do feijão, nos anos de 2021, 2022 e 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Pegada Hídrica azul determina a quantidade de água de mananciais superficiais e subterrâneos utilizada no atendimento à demanda hídrica da cultura na produção, principalmente na época da seca quando se tem baixos volumes de chuva. O valor médio da Pegada Hídrica azul (PHazul) que encontramos neste trabalho foi de $815,52 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, considerando as três safras. Rondon (2023) estimou os valores da Pegada Hídrica azul do feijão de inverno em dois biomas no estado do Mato Grosso, nas safras de 2015/2016 a 2020/2021, chegando a uma média da PHazul de $1.295,18 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ no Cerrado e de $1.355,18 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ na transição Cerrado - Amazônia, bem além dos $815,52 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ encontrados neste trabalho.

A Pegada Hídrica verde é a água da chuva que fica armazenada nas folhas das plantas e no solo, que é facilmente aproveitada. Os dados mostraram que não existe percentual de água verde embutida no cultivo do feijão e isso se deve ao do plantio ser feito já no período de seca e a colheita ser realizada no máximo até os primeiros dias de setembro, antes do início do período chuvoso. Diferentemente deste trabalho, os pesquisadores Mekonnen e Hoekstra (2011) estimaram a Pegada Hídrica verde para alguns cultivos, e os valores para o feijão resultaram em uma média global da PHverde de $3.945 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, o estudo foi realizado considerando Brasil, China, Índia, USA, Rússia, Canadá, Indonésia, Argentina e Paquistão.

Rondon (2023) observa muito bem que, apesar de ser importante que se estabeleça um valor que abrange uma área maior, recentemente vêm surgindo estudos de Pegada Hídricas locais que sugerem valores muito diferentes da média global, como é o caso do feijão cultivado no inverno em algumas regiões do Brasil que geralmente, terá sua Pegada Hídrica verde igual a zero por causa do período de seca.

Os resultados apresentados neste trabalho são mais uma prova disso, já que não houve chuva durante os períodos de plantio do feijão de inverno nos três anos considerados, resultando em PHverde igual à

zero em 2021, 2022 e 2023, entretanto Rondon (2023) estimou os valores da Pegada Hídrica verde do feijão de inverno em dois Biomas no Estado do Mato Grosso, nas safras de 2015/2016 a 2020/2021, chegando a uma média da PHverde de $525,78 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ no Cerrado e de $279,81 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ na transição Cerrado - Amazônia, sugerindo assim que houve alguma chuva durante o ciclo da cultura em ambos os Biomas.

A Pegada Hídrica cinza é a água utilizada para diluir poluentes, e na agricultura é calculada considerando produção de grãos, quantidade de produto químico aplicado por hectare e taxa de lixiviação do produto químico (descida do produto químico pelo solo). Com isso é estimada a quantidade de água necessária para diluir o poluente, pois, além da quantidade de água, é importante manter a qualidade da água dos rios. O valor da Pegada Hídrica cinza para safras de 2021, 2022 e 2023 foi em média de $342,44 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$, veja que a PHcinza se manteve praticamente constante nos três anos, como podemos observar na Tabela 5, uma vez que a taxa de Nitrogênio (N) aplicada a cada safra foi a mesma ($100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) e a produtividade nas três safras praticamente não variou, variáveis estas envolvidas no cálculo da PHcinza.

Vale ressaltar aqui que a PH cinza é um indicador interessante, porque quanto maior for a aplicação de adubos para nutrição das plantas, provavelmente maior será a produção da cultura, o que tende a diminuir a pegada cinza se o incremento na produção for compatível com aumento da adubação. Porém se a adubação, por algum motivo não surtir efeito esperado, a carga de poluente promoverá maior grau de poluição, sendo limitada apenas pelas resoluções que tratam do padrão da qualidade de água e de lançamento de efluentes, as resoluções CONAMA N. 357/2005 e a CONAMA N. 430/2011, respectivamente. Assim, os estudos referentes a resposta da planta a adubação são cruciais para promover uma adubação adequada, e assim não ter parte da adubação nitrogenada perdida por escoamento superficial ou por lixiviação afetando a qualidade das águas (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011).

Os pesquisadores Mekonnen e Hoekstra (2011) estimaram a Pegada Hídrica cinza para alguns cultivos, os valores para o feijão resultaram em uma média global de $983 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$. O estudo foi realizado considerando Brasil, China, Índia, USA, Rússia, Canadá, Indonésia, Argentina e Paquistão. Rondon (2023) estimou os valores da Pegada Hídrica cinza do feijão de inverno em dois Biomas no Estado do Mato Grosso, nas safras de 2015/2016 a 2020/2021, e relatou PHcinza média de $263,67 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ tanto para o Cerrado quanto para a transição Cerrado - Amazônia, diante da PHcinza de $342,44 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ encontrada neste trabalho. Isso se deve ao fato de termos utilizado uma taxa de aplicação de Nitrogênio de $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ para calcular a PHcinza (taxa essa fornecida pela administração da fazenda), enquanto Rondon (2023) adotou taxa de $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Usando essa mesma taxa de $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ adotada em Rondon (2023) o cálculo da PHcinza teria resultado de $205,46 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$.

Comparando o resultado encontrado neste trabalho com valores de Pegada Hídrica da cultura do feijão observados na literatura, bem como de outras culturas, verificamos que o valor resultante deste estudo é inferior aos das literaturas consultadas, podendo-se elencar algumas possíveis causas que possam justificar esses resultados, como: a alta produtividade da área de estudo comparando-a com as informações das produtividades do estado de Mato Grosso, da região do Centro Oeste e do Brasil; o fato da safra ser totalmente no período de seca, onde a Necessidade Hídrica da Cultura foi suprida por irrigação não havendo assim estresse hídrico, que é uma das principais causas da baixa produtividade; e ainda, outra possibilidade aparente pode ser o baixo valor de ET_0 , com ciclo entre maio a agosto evitando os meses mais quentes do ano na região (Souza *et al.*, 2013) em detrimento de outros trabalhos com feijão e outras culturas de grãos, relacionadas ao período de plantio e colheita de acordo com dados médios obtidos em entidades de monitoramento de safras (CONAB, 2023).

Enfim, relacionando o tema pegada hídrica a eficiência do uso da água, Quispe_Quezada, U. R. et al. (2023) buscaram determinar e relacionar a pegada hídrica, a produtividade econômica da água e a ecoeficiência agrícola de 15 culturas na província de Chupaca – Peru, e demonstraram que a pegada hídrica total foi superior em culturas (cereais e leguminosas) e menor pegada hídrica total em tubérculos. O ecoeficiência agrícola média total das quinze culturas foi de 89%; mais da metade das espécies teve ecoeficiência agrícola perfeita. E por fim, concluíram que os custos ambientais e os resultados econômicos da ecoeficiência agrícola não influenciaram o valor econômico da água, e ambos são independentes da produção agrícola, indicando as diversas relações que se pode criar com os indicadores de pegada hídrica e perspectivas para a gestão dos recursos hídricos.

Conclusões

Na região Médio Norte do estado de Mato Grosso a média da Pegada Hídrica (safras 2021 a 2023) para o feijão Dama Carioca TAA S2 foi de 1.157,96 m³.t⁻¹, sendo 70,43% referente à Pegada Hídrica azul e 29,57% referente à Pegada Hídrica cinza, e apresentou a menor Pegada Hídrica encontrada para esta cultura no Brasil.

A avaliação da demanda evapotranspirométrica e da necessidade hídrica da cultura do feijão para a região de estudo, indica um grande potencial de uso eficiente da água na produção desta cultura no Médio Norte do estado de Mato Grosso, comparativamente ao cultivo em outras localidades.

Os diferentes valores das componentes da Pegada a Hídrica deste estudo em relação aos resultados de outros estudos, ressalta a variabilidade desses indicadores, indicando a necessidade de futuras e melhores avaliações de todo o sistema de produção, considerando as condições meteorológicas e edáficas locais, bem como as práticas agrícolas específicas para a tomada de decisão na produção de alimentos com uso da Pegada Hídrica.

Apesar da Pegada Hídrica não medir eficiência do uso da água em sistemas de irrigação, esta se mostrou um bom indicador para a gestão de recursos hídricos, em que estes resultados contribuem não apenas para o conhecimento científico, mas também fornecem informações valiosas para a tomada de decisões relacionadas à gestão sustentável da água e à busca por práticas agrícolas mais eficientes.

Agradecimentos

Ao produtor rural Marcelo Knappi e sua equipe pela sempre e pronta disponibilidade de trabalho conjunto com nosso grupo TRECHO; à Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, campus Sinop, pelo apoio logístico concedido; e ao PPGCAM pela oportunidade em cursar o mestrado.

Participação do autor: Redação, revisão e edição. Metodologia e investigação.

Aprovação ética ou licenças de pesquisa: não se aplica.

Disponibilidade dos dados: os dados não estão disponíveis em nenhuma base de dados ou repositórios.

Fomento: não houve nenhuma via de financiamento.

Conflito de Interesses: o autor declara não haver conflito de interesses.

Referências

- Agritempo. 2023. Sistema de Monitoramento Agrometeorológico: Estação Meteorológica. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=MT>. Acesso em: 12 out. 2023.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 300p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- Alves, M. A. B.; Borella, D. R.; Da Silva Luz, C. C.; Castagna, D.; Da Silva, W. C.; Da Silva, A. F.; Almeida, F. T.; De Souza, A. P. 2022. Classes de solos nas bacias hidrográficas dos rios Caiabi e Renato, afluentes do rio Teles Pires, no sul da Amazônia. *Nativa*, 10(3): 431-448. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i3.14192>
- Brasil. 2023. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, Inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 08 nov. 2023.
- Brasil. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, 17 de março de 2005. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- Brasil. Resolução CONAMA no 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União, 16 de maio de 2011. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res43011.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- Bristow, K.L.; Campbell, G.S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31: 159- 166. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y.; Savenije, H. H. G.; Gautam, R. 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries, *Ecological Economics*, 60(1): 186–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.11.027>
- Chapagain, A; Tickner, D. 2012. Pegada Hídrica: evolução do conceito e sua utilidade a prática. In: Empinoti, V; Jacobi, P.R.(Org.). *Pegada Hídrica: inovação, corresponsabilização e os desafios de sua aplicação*. São Paulo: Annablume.
- CONAB: Companhia Nacional De Abastecimento. 2023. Acompanhamento da safra brasileira: séries históricas das safras de grãos. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras#gr%C3%A3os-2>. Acesso em: 10 nov. 2023
- Costa, M. R.; Moreira, M. C.; Silva, D. D. da; Alencar, K. M. de; Coelho, C. D. 2021. Water Footprint of soybean, cotton, and corn crops in the western region of Bahia State. *Eng Sanit Ambient*. 26(5): 971-978. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020041>
- Dos Santos, R. M. et al. 2022. Coeficiente de produtividade - Ky do feijão carioca (*Phaseolus Vulgaris* L. TAA Dama) para o município de Botucatu-SP. *Irriga*, 27(4): 785-794. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n4p785-794>
- EMBRAPA: Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. 2022. Cultura do Feijão. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agrossilvipastoril/sitio-tecnologico/trilhatecnologica/tecnologias/culturas/-feijao>. Acesso em: 30 ago. 2022.
- FAO - Food and Agriculture Organization. 2023. CROPWAT. The Food and Agriculture Organization. Disponível em: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>. Acesso em: 14 ago. 2023.
- Fischer Filho, J. A.; Zocoler, J. L. 2016. Estimativa do coeficiente de cultura (Kc) do feijoeiro em Ilha Solteira, SP. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 24(3): 229-235. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v24i3.665>
- Gebremariam, F. T.; Habtu, S.; Yazew, E.; Teklu, B. 2021. The water footprint of irrigation-supplemented cotton and mung-bean crops in Northern Ethiopia. *Heliyon*. 7(4): 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06822>
- Hoekstra, A. Y.; Hung, P. Q. 2002. *Quantificação dos fluxos de água virtuais*. Holanda: IHE Delfit, 120. P.

- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K. 2007. The Water footprints of Morocco and the Netherlands: Global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecological Economics*, 64(1), 143–151. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.023>.
- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge. ISBN 1136538518, 9781136538513. Disponível em: https://waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_English.pdf Acesso em: 30 set. 2023.
- Liu, X.; Xu, T.; Sun, S.; Wu, P.; Wang, Y. 2024. Water resource efficiency evaluation of crop production in arid and semi-arid regions based on water footprint and comparative advantage, *European Journal of Agronomy*, 160(1). 1161-0301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127310>
- Macedo, G. De; Silva, L. F. S.; Moreira, J. A. A. 2002. Manejo da adubação nitrogenada no feijoeiro irrigado sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 32(1): 1-5. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/2433>. Acesso em: 30 ago. 2023.
- Mantovani, E. C. et al. 2012. Estimativa de produtividade da cultura do feijão irrigado em Cristalina-GO, para diferentes lâminas de irrigação como função da uniformidade de aplicação. *Engenharia Agrícola*, 32: 110-120. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100012>.
- Martim, C. C.; Souza, A. P. 2021. Estimativas da radiação global com base na insolação na Amazônia brasileira. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, 12(10): 233-246. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0020>.
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, Holanda. 15: 1577-1600. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>.
- Mendonça, J. C. et al. 2007. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11: 471-475. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000500004>.
- Quispe_Quezada, U. R. et al. 2023. Agricultural eco-efficiency and water footprint - A case study of fifteen crops in the Chupaca province of Peru. *Journal of Applied and Natural Science*. 15(4): 1627-1635. DOI: <https://doi.org/10.31018/jans.v15i4.4410>
- Rondon, D. da S. R. 2023. Pegada hídrica da produção de grãos em polos de irrigação do Cerrado e da transição Cerrado - Amazônia de Mato Grosso, Brasil. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 78 f.
- Sales, R. A. de et al. 2017. Índice de satisfação das demandas de água e produtividade do feijão em diferentes lâminas de irrigação em Colatina-ES. *Energia na Agricultura*, 32(1): 81-87. DOI: [10.17224/EnergAgric.2017v32n1p81-87](https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n1p81-87)
- Santos, G. R.; Oliveira, E. Dos S.; Madi, R. R. 2023. Pegada Hídrica da produção agrícola do arroz e do feijão em Sergipe. XV Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, XV – ABRHidro. Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe - 20 a 24 de março de 2023, Aracaju/SE. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/206/XV-ENREHSE0033-1-20230228-233243.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- Souza, A. P. De; Silva, A. C. Da; Tanaka, A. A.; Uliana, E. M.; Almeida, F. T. De; Klar, A. E.; Gomes, A. W. A. 2017. Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(4): 215-227. DOI: [10.31413/nativa.v9i5.13168](https://doi.org/10.31413/nativa.v9i5.13168)
- Souza, T. L. P. O., Pereira, H. S., De Faria, L. C., Wendland, A., Da Costa, J. G. C., Abreu, A., Dias, J. L. C., Magaldi, M. C. S., Souza, N. P., Del Peloso, M. G. & Melo, L. C. 2013. Cultivares de feijão comum da Embrapa e parceiros disponíveis para 2013. Comunicado técnico 221, Santo Antônio de Goiás, GO. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/105967/1/166-1.pdf>. Acesso em 10 jul. 2023.