

KALIANA GOTTSCHALK DE FREITAS

**EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DO FEIJOEIRO SUBMETIDO AO DÉFICIT
HÍDRICO CONTROLADO**

**Botucatu
2025**

KALIANA GOTTSCHALK DE FREITAS

**EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DO FEIJOEIRO SUBMETIDO AO DÉFICIT
HÍDRICO CONTROLADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador(a): João Carlos Cury Saad
Coorientador(a): Guilherme Augusto
Biscaro

Botucatu

2025

D316e de Freitas, Kaliana Gottschalk
Eficiência do uso da água do feijoeiro submetido ao déficit hídrico controlado / Kaliana Gottschalk de Freitas. -- Botucatu, 2025
51 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: João Carlos Cury Saad

1. sensoriamento remoto. 2. índice de vegetação. 3. produtividade.
4. manejo de irrigação. 5. área foliar. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA DO FEJJOEIRO SUBMETIDO AO DÉFICIT HÍDRICO CONTROLADO

AUTORA: KALIANA GOTTSCHALK DE FREITAS

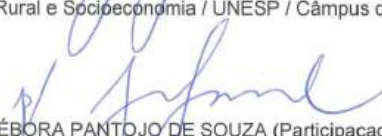
ORIENTADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

COORIENTADOR: GUILHERME AUGUSTO BISCARO

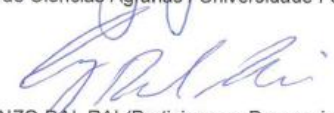
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:



Professor Doutor JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA



Prof.ª Dr.ª DÉBORA PANTOJO DE SOUZA (Participação Virtual)
Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade Federal da Grande Dourados



Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Botucatu, 25 de novembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me sustentar, fortalecer e guiar em cada etapa desta jornada.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante e incentivo nos momentos mais desafiadores.

Ao Prof. Dr. João Carlos Cury Saad, pela orientação dedicada, pelos ensinamentos transmitidos com paciência e sabedoria, e pelo exemplo inspirador de professor e pesquisador.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), pelo conhecimento compartilhado e pelo apoio prestado ao longo do curso.

Aos amigos Lucas, Magda e Natália, pela amizade, companheirismo e acolhimento, que tornaram esta caminhada mais leve e significativa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O apoio financeiro por meio da bolsa de estudos concedida foi fundamental para a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso do déficit hídrico, aliado a ferramentas de monitoramento, é fundamental para a sustentabilidade agrícola, especialmente em cenários de escassez hídrica. O objetivo desse estudo foi avaliar o uso integrado da irrigação com déficit controlado e do monitoramento hídrico por meio de tensiometria e índices de vegetação, em especial o Índice de Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC), nos componentes de produção e na eficiência de uso da água do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). A pesquisa foi realizada no Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônômicas – Campus Botucatu – UNESP. O experimento teve quatro tratamentos: tratamento 1 (T1) = 10 a 15 kPa; tratamento 2 (T2) = 15 a 30 kPa; tratamento 3 (T3) = 30 a 50 kPa; tratamento 4 (T4) = 50 a 75 kPa, correspondentes a 100%, 80%, 60% e 40% da capacidade de água disponível no solo (CAD), respectivamente. Foram utilizados tensiômetros para mensuração da tensão da água no solo (TAS); imagens multiespectrais capturadas com veículo aéreo não tripulado (VANT) para cálculo do NDVI; termometria infravermelha para determinação do IEHC. Avaliaram-se variáveis agrônômicas, como: massa fresca (MF); massa seca (MS); área foliar (AF); número de vagens por planta; número de grãos por vagem; peso de 100 grãos (g); produtividade (kg ha^{-1}) e eficiência do uso da água (EUA) (kg m^{-3}). Os resultados indicaram correlação negativa entre as variáveis de crescimento e estresse hídrico. Apesar do tratamento 1 ter apresentado a maior produtividade ($4.855,84 \text{ kg ha}^{-1}$), a melhor eficiência do uso da água (EUA) foi observada no tratamento 3, correspondente à faixa de tensão de 30 a 50 kPa, intervalo que abrange os valores amplamente utilizados como critério de manejo da irrigação do feijoeiro. Concluiu-se que o uso integrado de índices espectrais e variáveis fisiológicas é uma estratégia promissora para avaliar o impacto do déficit hídrico sobre o crescimento vegetal, fornecendo subsídios para práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; índice de vegetação; produtividade; manejo de irrigação; área foliar.

ABSTRACT

The use of controlled water deficit, combined with monitoring tools, is essential for agricultural sustainability, especially under water scarcity conditions. This study aimed to evaluate the integrated use of controlled deficit irrigation and water monitoring through tensiometry and vegetation indices, particularly the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Crop Water Stress Index (CWSI), on yield components and water use efficiency of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). The research was carried out at the Department of Rural Engineering and Socioeconomics, Faculty of Agronomic Sciences – Botucatu Campus – UNESP. The experiment comprised four treatments: treatment 1 (T1) = 10–15 kPa; treatment 2 (T2) = 15–30 kPa; treatment 3 (T3) = 30–50 kPa; and treatment 4 (T4) = 50–75 kPa, corresponding to 100%, 80%, 60%, and 40% of the soil available water capacity (AWC), respectively. Tensiometers were used to measure soil water tension (SWT); multispectral images acquired by an unmanned aerial vehicle (UAV) were used to calculate NDVI; and infrared thermometry was applied to determine CWSI. Agronomic variables evaluated included fresh mass (FM), dry mass (DM), leaf area (LA), number of pods per plant, number of grains per pod, weight of 100 grains (g), yield (kg ha^{-1}), and water use efficiency (WUE) (kg m^{-3}). Results showed a negative correlation between growth variables and water stress. Although treatment 1 yielded the highest productivity ($4,855.84 \text{ kg ha}^{-1}$), the highest water use efficiency was observed in treatment 3, corresponding to the 30–50 kPa tension range—values widely used as an irrigation management criterion for common bean. The integrated use of spectral indices and physiological variables proved to be a promising strategy for assessing the impact of water deficit on plant growth, providing valuable insights for more efficient and sustainable irrigation management practices.

Keywords: remote sensing; vegetation index; yield; irrigation management; leaf area.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	A CULTURA DO FEIJOEIRO.....	15
2.2	CULTIVO DO FEIJÃO NO BRASIL.....	17
2.3	IRRIGAÇÃO NO FEIJOEIRO.....	18
2.4	MANEJO DE IRRIGAÇÃO.....	19
2.5	TENSIOMETRIA.....	20
2.6	SENSORIAMENTO REMOTO (SR).....	21
2.7	ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NORMALIZADA (NDVI).....	22
2.8	ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO NA CULTURA (IEHC).....	23
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	25
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.3	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO.....	28
3.4	MANEJO DE IRRIGAÇÃO.....	29
3.5	CAPTURE DE IMAGENS E PROCESSAMENTO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS.....	30
3.6	CÁLCULO DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO.....	31
3.6.1	NDVI.....	31
3.6.2	Índice de estresse hídrico da cultura (IEHC).....	32
3.7	PARÂMETROS AGRONÔMICOS.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A cultura do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) desempenha papel essencial na dieta da população brasileira, sobretudo entre as famílias de menor renda, em razão de seu elevado valor nutricional e da ampla adaptabilidade ao cultivo em diferentes regiões e épocas do ano (Santos; Lima, 2015; Dalchiavons *et al.*, 2016). O Brasil alcançou uma produção estimada em 2,84 milhões de toneladas na safra 2021/22 e produtividade média de 1.090 kg·ha⁻¹ o que o colocou como o segundo maior produtor mundial de feijão (IBGE; 2022). Contudo, projeções apontam a necessidade de aumento de 44% na produção nacional até 2050 para suprir a crescente demanda (EMBRAPA, 2017), o que reforça urgência por sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis.

Apesar da relevância econômica e social, a produtividade do feijão no Brasil ainda é limitada por fatores como baixo nível de tecnificação, restrições socioeconômicas, baixa fertilidade dos solos e, principalmente, manejo hídrico inadequado (Carneiro, 2006). Nesse cenário a irrigação surge como alternativa promissora, sobretudo quando associada a estratégias que visam otimizar o uso da água. A irrigação com déficit controlado destaca-se como técnica auxiliar na redução do consumo hídrico sem comprometer significativamente o potencial produtivo, contribuindo para maior eficiência no uso desse recurso (Lopez *et al.*, 2017).

A aplicação eficaz dessa estratégia depende de métodos confiáveis de monitoramento hídrico da cultura, os quais podem se basear na umidade do solo, nas respostas fisiológicas das plantas e em ferramentas de sensoriamento remoto (Iluoma *et al.*, 2017). Dentre eles, a tensiometria se sobressai como técnica prática e consolidada, permitindo estimar indiretamente a umidade do solo por meio da medição da tensão de água, estabelecida pela curva de retenção (Teixeira, *et al.*, 2017).

Os Índices de Vegetação (IV's), como por exemplo o NDVI, possibilitam monitorar o vigor da planta, a eficiência fotossintética e o estado hídrico do dossel, com elevada sensibilidade as variações no ambiente, através do uso de sensoriamento remoto com câmeras multiespectrais e sensores embarcados em veículos aéreos não tripulados (VANT'S) (Epiphanyo *et al.*, 1996; Zanzarini *et al.*, 2013). Outro índice bastante utilizado é o índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC), o qual quantifica o nível de estresse hídrico nas plantas com base na

normalização de linhas de temperatura de referência com ou sem estresse hídrico (Bucks *et al.*, 1985).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do uso integrado da irrigação com déficit controlado e do monitoramento hídrico por meio de tensiometria e índices de vegetação (IV's) na produtividade e na eficiência de uso da água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Buscou-se compreender como essas ferramentas podem contribuir para um manejo mais preciso da irrigação, favorecendo a manutenção do potencial produtivo da cultura, a racionalização do uso da água e a mitigação dos efeitos do estresse hídrico nos estádios fenológicos mais sensíveis.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do feijoeiro

Com origem nas Américas, o feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das 55 espécies pertencentes ao gênero *Phaseolus*. As variedades atualmente cultivadas e comercializadas resultam de um longo processo de domesticação a partir de espécies primárias (Freitas, 2006). Trata-se de uma cultura de grande relevância econômica, alimentar e cultural em diversos países, constituindo importante fonte de proteínas, fibras e minerais. No Brasil, o cultivo do feijão ocorre em praticamente todo o território nacional, com destaque para a agricultura familiar, responsável por cerca de 67% da produção brasileira desse grão (Quinteiro *et al.*, 2018).

Do ponto de vista botânico, o feijoeiro comum é uma planta anual, autógama e diploide, caracterizada pela predominância da autopolinização. Pertence à família Fabaceae, ordem Rosales, gênero *Phaseolus* e espécie *Phaseolus vulgaris* L. Suas folhas apresentam heterofilia, ou seja, a planta desenvolve dois tipos distintos de folhas: um par de folhas simples originado a partir do embrião, sendo as únicas desse tipo presentes na planta, que caem antes do término do seu ciclo de desenvolvimento; e as folhas compostas trifoliadas, compostas por três folíolos, sendo o folíolo central simétrico e os dois laterais assimétricos. A área foliar do feijoeiro pode variar considerável, influenciada tanto por fatores ambientais quanto pela cultivar utilizada (Cunha, 2009; Leon, 1968).

O sistema radicular do feijoeiro é do tipo pivotante, podendo atingir profundidades de até 40 cm de profundidade. Entretanto, aproximadamente 80% das raízes concentram-se nos primeiros 20 cm do solo, o que torna a cultura especialmente sensível às variações na disponibilidade hídrica. Por essa razão, para fins de manejo da irrigação, considera-se como profundidade efetiva do sistema radicular a faixa de 20 cm. O caule é uma haste ramificada com gemas vegetativas e florais, e o fruto é classificado como legume seco (Santos *et al.*, 2015; Silva, 2004).

Em relação ao hábito de crescimento, o feijoeiro pode ser classificado em quatro tipos: tipo I, crescimento determinado e ereto, com inflorescências terminais; ou como indeterminado, dividido em semiereto, tipo II; prostrado, tipo III; e trepador, tipo IV, com inflorescências axiais (Vilhordo *et al.*, 1996; Oliveira *et al.*, 2018).

Metabolicamente, o feijoeiro é uma planta C3, realizando a fixação de dióxido de carbono (CO₂) pelo Ciclo de Calvin, no qual o carbono atmosférico é convertido em compostos orgânicos essenciais à formação de tecidos vegetais. Processos como fotossíntese, respiração e fotorrespiração afetam diretamente a produtividade da cultura (Marenco *et al.*, 2009).

A disponibilidade hídrica exerce papel crucial nesse processo. Em condições de altas temperaturas e déficit de água, o feijoeiro tende a fechar seus estômatos para preservar água. Essa resposta, contudo, limita a absorção de CO₂, promove acúmulo de oxigênio e intensifica a fotorrespiração, processo que ocorre apenas na presença de luz, não gerando energia útil para a planta, o que representa perda metabólica significativa (Haven *et al.*, 2007). Como consequência, plantas C3 submetidas a estresse hídrico e alta intensidade luminosa podem apresentar reduções no potencial produtivo. Nesse contexto, estratégias de manejo que visem minimizar a fotorrespiração e melhorar a eficiência no uso da água tornam-se fundamentais para ganhos de produtividade.

A demanda hídrica da cultura varia conforme a fase de desenvolvimento e as condições climáticas locais. O feijoeiro é particularmente sensível ao déficit hídrico, especialmente nos estádios de floração e formação das vagens, fases em que a falta de água pode ocasionar aborto das flores, queda das vagens e redução no número de grãos. Monteiro *et al.* (2010) destacam a relevância do uso da irrigação como prática indispensável para estabilizar a produtividade, considerando o ciclo curto da cultura e suas diferentes necessidades hídricas ao longo dos estádios fenológicos.

O ciclo do feijoeiro é composto por cinco estádios vegetativos (V0, V1, V2, V3 e V4) e cinco estádios reprodutivos (R5, R6, R7, R8 e R9). Em média, o ciclo dura 90 dias, podendo variar entre 65 dias em cultivares precoces e até 115 dias em cultivares tardias (Salvador e Pereira, 2021). Essa diversidade de ciclos, somada à plasticidade da cultura frente a diferentes ambientes, reforça sua importância estratégica tanto para a segurança alimentar quanto para a geração de renda em sistemas produtivos de pequena, média e grande escala.

2.2 Cultivo do feijão no Brasil

No Brasil, a combinação arroz com feijão constitui a base da alimentação da população, sendo um dos principais símbolos da dieta nacional. De acordo com Ferreira *et al.* (2018), o consumo médio de feijão por habitante chega a 15kg por ano, colocando o país como o maior produtor e consumidor mundial do grão, seguido por México, a Zona Andina, a América Central e o Caribe.

Apesar da expressiva produção, a cadeia produtiva da feijocultura apresenta um desafio estrutural: a grande heterogeneidade entre os sistemas de produção. De um lado, predominam os pequenos e médios produtores, que em geral utilizam baixo nível tecnológico, com mão de obra pouco qualificada e maior dependência de condições climáticas. No extremo oposto, estão os grandes produtores rurais, que cultivam extensas áreas com alto nível de mecanização, uso de irrigação e mão de obra qualificada.

No cenário nacional, o Paraná lidera a produção, com 524 mil toneladas. Na sequência, destacam-se Minas Gerais (522,6 mil t); Mato Grosso (358,7 mil t); Goiás (321,2 mil t); Bahia (219 mil t); São Paulo (173,3 mil t); Ceará (114,1 mil t); e Pernambuco (104,9 mil t). Juntas, essas oito unidades federativas responderam por aproximadamente 82% da safra de 2021/2022.

A sazonalidade é uma característica marcante da feijocultura brasileira, já que a cultura pode ser cultivada em três safras anuais:

- Primeira safra (águas): semeadura entre agosto e outubro;
- Segunda safra (seca): semeadura entre janeiro e abril;
- Terceira safra (inverno): semeadura entre maio e junho.

As safras das águas e da seca são as mais expressivas, representando mais de 70% da produção nacional.

Quanto a variedade genética, o Brasil cultiva cerca de 14 tipos de feijão, com destaque para o carioca, predominante no mercado, o preto, muito consumido na região Sul, além do fradinho e outras variedades de grãos brancos, vermelhos e roxos, que atendem tanto o mercado doméstico quanto as demandas de exportação. Essa diversidade reflete a ampla adaptação da cultura as diferentes condições edafoclimáticas do país, bem como as preferências regionais de consumo (Salvador e Pereira, 2021).

2.3 Irrigação no feijoeiro

A cultura do feijão exige de 300 a 500 mm de água acumulada durante o ciclo, que pode variar de 60 a 120 dias. O déficit hídrico implica na redução da taxa fotossintética, o que resulta na perda de potencial produtivo em um nível que depende do estágio fenológico e da intensidade que acontece. Quando a falta de água acontece na fase vegetativa pode ocasionar diminuição da área foliar, já na fase reprodutiva os estágios de maior sensibilidade são de floração e enchimento dos grãos. A deficiência hídrica nessas fases resulta em abortamento e queda das flores, resultando em redução do número de vagens por planta e número de grãos por vagem (Távora e Diniz, 2006).

O excesso hídrico também pode ser prejudicial ao feijoeiro, principalmente quando acontece no início da fase reprodutiva, onde a planta se apresenta mais sensível a má aeração do solo (Silva & Steinmetz, 2005). Além disso, a diminuição da absorção de nutrientes, o aumento de concentração de substâncias tóxicas a planta, a diminuição do crescimento e do potencial de água nas folhas são outros pontos negativos que podem ocorrer em situação de excesso de água.

A partir da década de 1980, o feijoeiro passou a ser cultivado sob sistema irrigado na safra de inverno, o que atraiu médios e grandes produtores para a cadeia produtiva. Esse avanço estimulou a adoção de tecnologias mais avançadas, permitindo alcançar produtividades superiores às obtidas em sequeiro, uma vez que o feijoeiro é altamente responsivo à irrigação, podendo alcançar produtividades próximas de $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Binotti *et al.*, 2007; Muñoz-Perea *et al.*, 2007).

Um exemplo de sucesso pode ser observado no estado de São Paulo, na região de Paranapanema, onde a produtividade média alcança 3.000 kg.ha^{-1} com o uso da irrigação (PAM, 2020). Esse potencial pode ser expandido em todo Brasil mediante a adoção de práticas de manejo eficiente da irrigação, cujo objetivo é fornecer a quantidade requerida de água, no momento adequado, de acordo com a necessidade fisiológica da cultura. Assim, é possível evitar tanto o estresse hídrico quanto o desperdício de recursos.

2.4 Manejo de irrigação

Martins et al. (2002) relatam que 70% da água consumida no mundo é destinada à irrigação, o que evidencia a importância do uso eficiente e sustentável desse recurso natural. Nesse contexto, a agricultura irrigada tem intensificado sua preocupação com o fornecimento adequado de água às plantas. A eficiência no uso da água (EUA), ou seja, a produção final por unidade de água utilizada, deve ser aumentada. Em regiões com precipitação insuficiente ou distribuição irregular de chuvas, a irrigação torna-se um fator imprescindível para garantir produção em qualidade e quantidade. Por essa razão, a área irrigada tem aumentado significativamente em todo o mundo.

Para que a irrigação seja aplicada de forma eficiente e sustentável, o uso do manejo da irrigação é essencial. Essa prática determina quando e quanto irrigar, assegurando que a demanda hídrica da cultura seja atendida sem comprometer a produtividade, evitando desperdícios e impactos negativos no rendimento final.

Para auxiliar no manejo da irrigação, diversos métodos podem ser utilizados para estimar a quantidade de água necessária à cultura. Entre eles destacam-se: o método baseado em dados climáticos, que repõe o consumo diário de água pela cultura (evapotranspiração); o método do Tanque Classe A, que integra variáveis meteorológicas e características da cultura, apresentando baixo custo e fácil aplicação para o irrigante; e o método baseado no monitoramento do solo, por meio de tensiômetros, sensores práticos e precisos que medem a tensão da água no solo. Quanto maior a tensão registrada, menor o teor de água disponível no solo (CAD) para as plantas (Teixeira *et al.*, 2017).

Além do manejo convencional, estratégias alternativas têm sido investigadas para aumentar a eficiência do uso da água, como a irrigação com déficit controlado ou regulado. O princípio dessa prática é otimizar a produção em função do volume de água aplicado, possibilitando a viabilidade agrícola em regiões historicamente deficitárias em precipitação. Essa técnica permite reduzir a aplicação de água em determinados estádios do ciclo sem comprometer a rentabilidade da cultura, resultando em maior eficiência hídrica (Soares *et al.*, 2021).

Estudos recentes têm buscado compreender a tolerância e a sensibilidade das espécies vegetais ao déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos. Isso porque tanto a necessidade hídrica quanto a resposta fisiológica da planta variam ao longo

do ciclo. Os efeitos podem ser negativos, reduzindo o desenvolvimento e a produtividade, mas também podem resultar em um equilíbrio benéfico entre água aplicada e rendimento obtido, favorecendo a produtividade da água e promovendo um uso mais racional dos recursos hídricos (Silva *et al.*, 2012; Chai *et al.*, 2016).

2.5 Tensiometria

O tensiômetro, equipamento desenvolvido em 1922 por Gardner, é considerado um dos métodos mais utilizados para determinação da tensão de água no solo. É constituído por uma cápsula porosa, conectada a um tubo PVC no qual contém um instrumento de leitura, chamado de tensímetro, sendo o seu interior preenchido com água. Quando instalado no solo, a água contida na cápsula tende a entrar em equilíbrio com a tensão da água no solo, chamada de potencial matricial, verificando assim se o solo está ou não com umidade suficiente para a cultura (Campbell; Mulla, 1990).

Para que seja possível determinar a umidade do solo via tensiometria, é necessário utilizar a curva de retenção de água no solo. Ela descreve a relação entre a quantidade de água no solo e a tensão que essa água está retida nos poros. Quanto maior for a tensão, mais seco o solo se encontra. Essa análise é essencial para entender a disponibilidade da água para as plantas, manejo de irrigação e qualidade do solo. Ela caracteriza a retenção de água em solos de texturas distintas e permite determinar a umidade do solo em pontos de interesse para o manejo da irrigação, como é o caso da Capacidade de Campo (CC) e do Ponto de Murcha Permanente (PMP), cuja diferença representa a Água Disponível (AD) no solo. Essas informações permitem entender a dinâmica da água no solo, bem como elaborar estratégias sustentáveis e eficazes na mitigação de estresse hídrico (Silva *et al.*, 2019).

No que diz respeito à instalação dos tensiômetros, recomenda-se atenção tanto ao posicionamento quanto à profundidade. Segundo Silveira e Stone (2005), os instrumentos devem ser instalados preferencialmente na entrelinha da cultura ou, no caso de espécies perenes, próximo ao caule, logo após a emergência das plantas. Em relação à profundidade, a instalação deve ocorrer na região de maior concentração e atividade do sistema radicular, uma vez que é onde as plantas realizam a maior parte da absorção de água. Além disso, é aconselhável o uso de

pelo menos três tensiômetros por área de monitoramento, de modo a garantir uma média representativa das condições de umidade do solo.

2.6 Sensoriamento remoto (SR)

Segundo Crepani (1993), caracteriza-se sensoriamento remoto (SR) a obtenção de informações sobre um objeto, área ou fenômeno, através de sensores instalados em plataformas aéreas e orbitais, sem que haja contato físico com o alvo, sendo que, posteriormente, a informação é convertida em imagens. Cada alvo tem característica única de reflexão e emissão de energia eletromagnética, a qual é transportada em formas de ondas eletromagnéticas e apresenta comprimentos que vão de nanômetros até vários metros. A radiação é mensurada pelos sensores com base na emissão de fótons. Há uma relação inversa entre o comprimento de onda e a frequência, sendo que, comprimentos de onda menores, apresentam maior frequência, portanto, maiores níveis de energia.

O uso do SR possibilita a análise de grandes áreas com rapidez e eficiência, o que explica sua ampla aplicação na agricultura de precisão (Bernardi *et al.*, 2014). Entre suas aplicações, destacam-se as imagens multiespectrais, que transformaram a forma de monitorar diferentes parâmetros de campo, como o estágio de desenvolvimento das culturas, a detecção de estresse hídrico, a estimativa de produtividade e a identificação de plantas daninhas, pragas e doenças (Moriya, 2015). Os sensores multiespectrais são capazes de captar diferentes faixas do espectro eletromagnético, fornecendo informações específicas sobre os elementos presentes na superfície (Shiratsuchi *et al.*, 2014).

Comumente, o sistema de sensoriamento remoto (SR) está associado ao uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), equipamentos portáteis que oferecem praticidade, flexibilidade operacional e boa adaptação às diferentes demandas de coleta de dados. Essa associação foi evidenciada no estudo de Calou *et al.* (2017), no qual VANTs equipados com sensores multiespectrais foram empregados na detecção de plantas daninhas em áreas de sorgo, possibilitando a construção de um banco de classificação e viabilizando a aplicação de herbicidas de forma mais eficiente e localizada, o que resultou em redução de custos. Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), os VANTs são definidos como aeronaves projetadas para

operar sem piloto embarcado, podendo ser controladas remotamente ou de forma autônoma.

O primeiro registro do uso de VANT remonta a 1849, quando o exército austríaco utilizou balões carregados com bombas durante ataques a Veneza, segundo Assaiante e Cavivhioli (2020). No Brasil, o primeiro protótipo surgiu em 1982, desenvolvido pela Companhia Brasileira de Tratores (CBT) em parceria com o Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA). O modelo ficou conhecido como BQM – 1BR, criado para fins militares, como por exemplo missões de reconhecimento, treinamentos aéreos e como alvo para armamentos antiaéreos.

Na agricultura, o uso de VANT tem expandido rapidamente, devido a sua versatilidade. Com o acoplamento de sensores e câmeras é possível realizar o monitoramento e coleta de dados de grandes áreas quase que em tempo real, auxiliando na tomada de decisão e planejamento estratégico das lavouras. Entre as principais aplicações, destacam-se, pulverização, mapeamento topográfico, detecção de falhas no plantio, a identificação de bióticos e abióticos e até mesmo a estimativa da produtividade (Fernandes, 2016).

Diversos estudos comprovam a eficiência dessa associação entre SR e VANTs. Fernandes (2016), por exemplo, utilizou mosaicos de imagens multiespectrais e índices de vegetação para estimar a produtividade do milho, enquanto Alvares *et al.* (2008) aplicaram a mesma metodologia na cultura do sorgo. Já Crusiol *et al.* (2017) empregaram sensores multiespectrais e termais acoplados a VANTs para monitorar e identificar o déficit hídrico na soja.

2.7 Índice de vegetação normalizada (NDVI)

De acordo com Jackson e Huete (1991), os índices de vegetação (IVs) resultam de operações algébricas entre bandas espectrais, visando reduzir a interferência do solo e realçar parâmetros da vegetação. Esses índices podem estar associados à estrutura, bioquímica ou fisiologia das plantas e, em geral, utilizam bandas do visível e do infravermelho próximo.

Os primeiros IV's, baseados em proporções simples entre essas bandas, tiveram como objetivo distinguir a vegetação de outros alvos da superfície terrestre, sendo o Simple Ratio (SR), desenvolvido por Birth e Macvey, em 1968, pioneiros da técnica. No contexto agrônomo, os IVs permitem estimar variáveis como índice de

área foliar, cobertura vegetal, teor de clorofila, estresse hídrico, biomassa verde, fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e produtividade (Zhao *et al.*, 2018).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos indicadores espectrais mais utilizados no monitoramento agrícola, sendo calculado a partir da razão entre as refletâncias do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED). Seus valores variam entre -1 e +1: valores próximos de +1 indicam vegetação densa e fotossinteticamente ativa; valores próximos de 0 estão associados a solo exposto ou vegetação esparsa; e valores negativos tendem a indicar superfícies como água ou nuvens (Ponzoni *et al.*, 2012). Apesar de sua ampla aplicação, o NDVI pode apresentar limitações em situações de saturação do sinal em dosséis densos, sendo influenciado por fatores como posição da folhagem, arquitetura do dossel, teor de água e refletância do solo (Huete *et al.*, 2002).

Na agricultura, o NDVI tem se mostrado uma ferramenta eficiente para o monitoramento do crescimento e da produtividade das culturas. Bredemeier *et al.* (2013) observaram elevada correlação entre NDVI e biomassa de trigo, enquanto Coelho *et al.* (2018) reportaram resultados semelhantes para aveia. Sandrini *et al.* (2019) demonstraram sua acurácia na estimativa da produtividade do feijoeiro. Em culturas de maior biomassa, como soja e milho, Sampaio *et al.* (2021) verificaram que o NDVI é eficaz para estimar a atividade fotossintética em estádios iniciais, mas tende a saturar em fases mais avançadas, reduzindo sua sensibilidade.

2.8 Índice de estresse hídrico na cultura (IEHC)

Métodos que analisam as características das plantas também têm sido empregados para determinar a quantidade de água a ser aplicada e o momento adequado da irrigação. Dentre esses métodos, destaca-se a determinação da temperatura da cobertura vegetal, a qual pode auxiliar na estimativa do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC), também conhecido como Crop Water Stress Index (CWSI). Proposto por Idso *et al.* (1981), esse índice tem como objetivo quantificar o nível de estresse hídrico das culturas. Posteriormente, Jackson *et al.* (1981) aprimoraram o índice ao incorporar variáveis como o déficit de pressão de vapor (DPV), o saldo de radiação (R_n) e a resistência aerodinâmica, possibilitando uma

compreensão mais detalhada da interação entre o clima e a temperatura do dossel vegetal.

O método baseia-se na normalização de linhas de referência de temperatura, representativas de condições com e sem estresse hídrico, as quais são específicas para cada cultura e podem variar de acordo com as condições climáticas do ambiente (Bucks et al., 1985). Entre as técnicas empregadas para mensurar a temperatura do dossel da cobertura vegetal (T_p), a termometria infravermelha destaca-se por sua praticidade e eficiência.

Os termômetros infravermelhos medem o fluxo de radiação térmica entre dois objetos. A determinação da temperatura da superfície de um alvo por meio desse tipo de termômetro baseia-se na medição da diferença entre a temperatura do sensor do equipamento e a do alvo, denominada temperatura relativa, bem como na medição da temperatura do próprio sensor (Wanjura & Upchurch, 1991).

A temperatura relativa do alvo é obtida por um sensor que capta uma amostra da radiação térmica infravermelha emitida, convertendo-a em um sinal elétrico cuja voltagem é proporcional à radiação captada. Esse sinal é então convertido em temperatura relativa por meio de uma relação linear entre temperatura e voltagem. A temperatura do sensor, por sua vez, é medida utilizando-se um termistor. A temperatura final do alvo corresponde à soma da temperatura do sensor com a temperatura relativa (Wanjura & Upchurch, 1991).

Quando a planta inicia um processo de estresse hídrico, ocorre a redução da condutância estomática e da troca de calor latente. Como consequência, o efeito de resfriamento promovido pela evaporação diminui, fazendo com que as folhas apresentem temperaturas mais elevadas (Stockle & Dugas, 1992).

Khera & Sandhu (1986) propõem que a temperatura média da cobertura vegetal da cultura estressada foi sempre mais alta do que aquela não estressada e a diferença variou de 0,1 °C a 7,7 °C, após e antes da irrigação, respectivamente. Pesquisas conduzidas por Allen *et al.* (2007) aplicaram o IEHC para determinar a necessidade de irrigação em culturas como milho e trigo, a partir da diferença entre as temperaturas da folha e do ar em relação à temperatura foliar considerada ideal. Além disso, estudos demonstram correlação positiva entre o IEHC obtido por meio da termometria infravermelha e parâmetros fisiológicos de estresse hídrico, como, condutância estomática, taxa de transpiração e teor de água no solo (Andrade Junior, *et al.*, 2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e caracterização do experimento

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus Botucatu, São Paulo (22°54’S, 48°27’O e 786m). De acordo com Franco et al (2023), pela classificação climática de Koppen, o clima da região é caracterizado como Aw, clima tropical. O solo predominante é Latossolo Vermelho distrófico, de textura argilosa e com teores médios a altos de óxido de ferro (EMBRAPA, 2018), cujas características físicas e químicas encontram-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Resultado da análise física granulométrica e classe textural do solo.

Camada	Argila	Silte	Areia	Classe Textural
cm		g.kg ⁻¹		
0-20	48,80	24,00	27,20	Argila
20-40	48,80	23,00	28,20	

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 2 - Resultado da análise química do solo.

pH	MO	S	P	K	H + Al	SB	CTC	V
	g.dm ⁻³		mg.dm ⁻³		mmolc.dm ⁻³		%	
5,2	25	31	32	3,9	35	44	79	56

Fonte: elaborado pelo autor

Antes do plantio, foi realizado o preparo convencional do solo, com aração e gradagem, seguido pela calagem, conforme recomendação de Ambrosano *et al.* (1977), visando elevar a saturação por base a 70%. Para isso, aplicou-se 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico com PRNT de 90%.

As sementes foram tratadas previamente à semeadura com Fipronil e Piraclostrobina, na dose de 200 ml do p.c/100kg de sementes, atuando como inseticida e fungicida, respectivamente. Adicionalmente, utilizou-se o fertilizante CoMo ML-14, fonte de molibdênio e cobalto, na dose de 0,15 l ha⁻¹. Como adubação aplicou-se o formulado 8-28-16 (NPK) durante a semeadura e 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N) em cobertura, parcelado em duas aplicações.

A semeadura foi efetuada em 24/04/2022, utilizando-se uma semeadura-adubadora da marca Semeato, equipada com sete linhas. Foram utilizadas sementes da cultivar TAA Dama, grupo “Carioca”, com espaçamento de 0,5 m entre linhas e densidade de 8 sementes por metro linear, resultando em aproximadamente 160 mil plantas por hectare. O estágio V2 teve início em 11/05/2022 quando mais de 50% das plantas apresentaram o par primário de folhas totalmente expandidas. A partir dessa fase, o ciclo da cultura teve duração de 91 dias até a maturação completa das vagens.

O controle de plantas daninhas foi realizado por meio de capinas manuais e pela aplicação de herbicidas seletivos em pós-emergência: Fomesafen e Cletodim, aplicados com pulverizador costal. Para o manejo de pragas e doenças, foram utilizados Acefato e Piraclostrobina.

A área experimental apresentou dimensões de 12 m de largura por 48 m de comprimento, totalizando 576 m² cultivados com *Phaseolus vulgaris* L., conforme ilustrado na Figura 1. O sistema de irrigação captava água de um lago localizado na parte inferior da área experimental.

Figura 1 - Área de estudo do experimento



Fonte: Google Earth, 2022.

3.2 Delineamento experimental

O estudo caracterizou-se como observacional, uma vez que, devido à dimensão da área experimental, não foi possível realizar a casualização dos tratamentos. Foram avaliados 4 tratamentos (Tabela 3), com cada parcela possuindo dimensões de 12 x 12 m, com uma bordadura de 3 metros e área útil de 6 x 6 m. Os tratamentos referiam-se ao momento de irrigar. Por exemplo, o tratamento 2 era irrigado quando a tensão de água no solo atingisse o intervalo de 15 a 30 kPa, elevando-se a umidade para a condição de capacidade de campo.

As plantas localizadas no centro das parcelas foram utilizadas para o sensoriamento remoto multiespectral, enquanto aquelas posicionadas na bordadura da parcela útil foram destinadas às demais análises.

Tabela 3 - Tratamentos em função da porcentagem da água disponível e a correspondente faixa de tensão de água no solo

Tratamentos	Faixa de tensão de água no solo	Água no solo
	kPa	%
1	5 a 15	100
2	15 a 30	80
3	30 a 50	60
4	50 a 75	40

Fonte: autoria própria, 2025.

A aplicação dos tratamentos teve início na fase fenológica de pré-floração (R5), por ser um dos períodos mais críticos da cultura em relação ao estresse hídrico, com forte influência sobre a formação de vagens e enchimento de grãos (Borém e Carneiro, 2015). As quatro fases de desenvolvimento do feijoeiro estão descritas da Tabela 4.

Tabela 4 - Duração, em dias e caracterização das fases fenológicas do feijoeiro, cultivar TAA Dama do grupo “Carioca”

DAE	Duração	Fases	Descrição dos estádios fenológicos
	dias		
1 a 42	42	I	Vegetativo: folha primária até os primeiros botões florais - V2, V3 e V4
43 a 63	21	II	Início da floração até as primeiras vagens - R5 e R6
64 a 84	21	III	Enchimento dos grãos - R7 e R8
85 a 91	7	IV	Maturação dos grãos - R9

Fonte: autoria própria, 2025.

Como variáveis de resposta, foram realizadas capturas semanais de imagens multiespectrais, além de mensurações da tensão da água no solo, da temperatura do dossel e da temperatura do ar, totalizando oito avaliações. A partir desses dados, foram calculados NDVI e o Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC).

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise multivariada do tipo análise dos principais componentes ou, do inglês, Principal Component Analysis (PCA).

3.3 Sistema de irrigação

Para conduzir a água do lago até a área experimental foi utilizada uma bomba marca KSB, tipo ETABLOC 40-200, equipada com rotor 209 mm de diâmetro, capacidade de vazão de $52 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e altura manométrica máxima de 80 mca, acoplada ao motor da marca Weg, com rotação 3520 rpm e potência de 20 CV.

A escolha do sistema de irrigação considerou as características do solo, a topografia da área experimental e o clima local, resultando na adoção de um sistema de aspersão convencional fixo, equipado com aspersores setoriais. Os aspersores utilizados foram da marca Agropolo, modelo NY 23 S, com bocal laranja de 3,5 mm de diâmetro, operando a uma pressão de 25 mca, proporcionando um diâmetro de molhamento de 25,2 m e vazão de $0,679 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

A tubulação de recalque foi do tipo PEAD de 50 mm de diâmetro, enquanto a tubulação interna à área experimental utilizou-se de engate rápido de 2". O manejo da irrigação foi conduzido com base na medição da tensão de água no solo, realizada por meio de tensiômetros e um tensímetro digital de agulha, garantindo o fornecimento adequado de água às plantas de acordo com os tratamentos estabelecidos.

3.4 Manejo de irrigação

O manejo da irrigação foi realizado por meio do método do balanço hídrico diário de água no solo (BH). Para sua aplicação, foi necessária a determinação da umidade do solo na Capacidade de Campo (CC), do Ponto de Murcha Permanente (PMP) e da Capacidade de Água Disponível (CAD). Para obtenção da curva característica de retenção de água no solo, amostras de solo foram coletadas em anéis volumétricos em duas profundidades, 20 cm e 40 cm. Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Fertilidade do Solo, do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP, campus Botucatu/SP.

Com base nos valores de umidade do solo e em suas respectivas tensões, foi possível ajustar a equação não linear proposta por Van Genuchten (1980). O ajuste da curva de retenção de água no solo foi realizado utilizando-se o software RETC, desenvolvido por Van Genuchten et al. (2009).

Tabela 5 - Valores encontrados para umidade do solo na capacidade de campo, crítica e ponto de murcha permanente

Conteúdo de água no solo		
	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	kPa
CC	28,85	10
CAD	21,38	33
PMP	18,16	1500

Fonte: autoria própria, 2025.

Legenda: CC = capacidade de água no solo, a 10 kPa; CAD = capacidade de água disponível no solo, a 33 kPa; PMP= ponto de murcha permanente, a 1500 kPa.

Com a curva característica de retenção de água no solo, foi possível realizar o balanço diário de entradas e saídas de água no solo. Para isso foram instalados quatro tensiômetros por tratamento, instalados a 20 cm de profundidade, correspondente à faixa em que se concentra a maior parte do sistema radicular do feijoeiro. Os tensiômetros foram posicionados de forma a garantir representatividade espacial adequada (Figura 2).

Figura 2 - Posicionamento dos tensiômetros dentro dos tratamentos



Durante a fase vegetativa, a irrigação foi mantida uniforme em todas as parcelas, visando assegurar condições ideais para o estabelecimento da cultura. A partir das fases de pré-floração e floração, consideradas críticas para o desenvolvimento das vagens e sementes, as lâminas de irrigação passaram a ser definidas de acordo com os tratamentos aplicados, permitindo a avaliação do déficit hídrico controlado como estratégia de manejo.

3.5 Captura de imagens e processamento de imagens multiespectrais

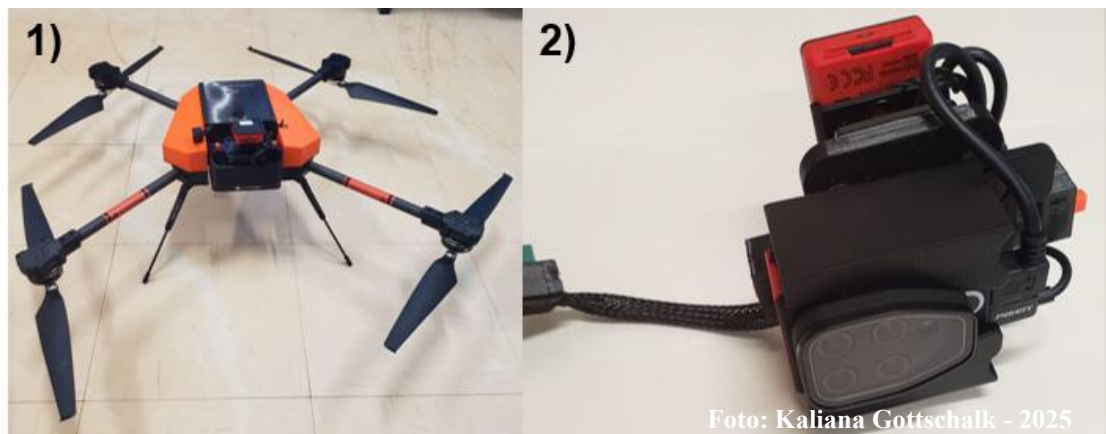
A captura das imagens aéreas foi realizada utilizando um conjunto composto por veículo aéreo não tripulado (VANT) e sensor multiespectral. O VANT empregado foi o modelo Spectral 2, desenvolvido pela empresa Nuvem UAV. O planejamento e controle dos voos foram efetuados por meio do software NCONTROL, também desenvolvido pela mesma empresa.

O sensor multiespectral Parrot Sequoia foi utilizado para a aquisição das imagens, capturando até quatro bandas espectrais distintas: vermelho, verde, azul e infravermelho próximo (NIR). Além disso, o sensor inclui uma câmera RGB com

resolução de 16 MP, permitindo registro visual detalhado da área experimental. Os componentes básicos do VANT estão representados na Figura 3.

O processamento das imagens multiespectrais foi realizado utilizando os softwares Agisoft Metashape e QGIS. No Agisoft Metashape, foram construídos os mosaicos experimentais a partir das imagens raster captadas pelo VANT e pelo sensor Parrot Sequoia. Posteriormente, no QGIS, foi extraído o NDVI a partir da manipulação das bandas multiespectrais. Para isso, pontos georreferenciados foram utilizados para aplicar buffers, permitindo a extração dos dados de cada pixel dentro da área útil da parcela.

Figura 3 - Componentes básicos de um VANT.



Legenda: 1) Espectral 2; 2) sensor Parrot Sequoia

3.6 Cálculo dos índices de vegetação

3.6.1 NDVI

Para gerar o índice NDVI foi utilizada a seguinte expressão matemática:

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

Verifica-se que o NDVI é o resultado da razão entre a diferença das reflectâncias das bandas do infravermelho próximo (NIR) e o vermelho (RED) pela soma dessas mesmas bandas espectrais. O valor pode variar de 1 a -1, sendo que valores próximos de 1 indicam vegetação fotossinteticamente ativa e, quando tendendo a 0, significa solo exposto. Os valores de NDVI foram extraídos a partir das imagens multiespectrais

capturadas em campo e gerados por meio do software Qgis, no qual foi possível utilizar as bandas multiespectrais necessárias.

3.6.2 Índice de estresse hídrico da cultura (IEHC)

A determinação do Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) foi efetuada em função das medidas de temperatura da cobertura vegetal e do ar ambiente. Para medir a temperatura da cobertura vegetal foi utilizado um termômetro infravermelho portátil, inclinando o aparelho em 30° com horizontal para a visada, em cada leitura. Foram efetuadas cinco leituras por parcela, realizadas entre 12:00 e 14:00 horas. O valor da temperatura da cobertura vegetal e do ar, em cada parcela, foi obtido pela média das cinco leituras.

O índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) foi calculado pela fórmula abaixo, a qual foi desenvolvida por Idso *et al.* (1981):

$$IEHC = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{LBI}}{(T_c - T_a)_{LBS} - (T_c - T_a)_{LBI}} \quad (2)$$

Em que: IEHC é o índice de estresse hídrico da cultura, $T_c - T_a$ é a diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar, $(T_c - T_a)_{LBS}$ é a linha de base superior e $(T_c - T_a)_{LBI}$ é a linha de base inferior.

Os valores de IEHC estão compreendidos entre 0 e 1, sendo que 0 representa plantas sem estresse hídrico, com transpiração plena; enquanto 1 representa estresse hídrico severo, com transpiração limitada. Valores intermediários refletem níveis de estresse parcial, podendo orientar a aplicação de irrigação (Trentin, 2010).

3.7 Parâmetros agronômicos

Ao longo do período reprodutivo foram avaliados: área foliar (AF), massa fresca (MF) e massa seca (MS). Enquanto as avaliações de número de vagens por planta, número de grãos por vagem, peso de 100 grãos, peso dos grãos de 20 plantas e produtividade de grãos (kg ha^{-1}), ocorreram quando a cultura apresentava 87 DAE (05/08/2022). Neste momento as plantas já apresentavam completa maturação fisiológica. Para isso, foram coletadas 20 plantas, escolhidas aleatoriamente, dentro da área útil experimental.

A partir dos valores médios de produtividade de grãos (kg ha^{-1}), da precipitação registrada durante o período experimental e da lâmina total de irrigação aplicada ao longo do ciclo da cultura (mm) em cada tratamento, foi possível estimar a eficiência do uso da água pela cultura (kg m^{-3}), conforme a equação apresentada a seguir:

$$EUA = \frac{\text{produtividade média dos grãos}}{\text{lâmina acumulada}} \quad (3)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período do experimento contabilizou-se precipitação efetiva de 41,09 mm, sendo os meses de maio e junho os mais chuvosos. A temperatura média do período estudado foi de 19°C, sendo que a temperatura mínima foi de 3,7 °C no dia 18/05/2022 e a máxima de 30,38 °C em 05/08/2025. Praela e Ribeiro (2002) salientam que em épocas com temperaturas amenas, o feijoeiro leva um maior número de dias para completar seu ciclo fenológico. Neste trabalho o feijão levou 91 dias após a germinação para completar seu ciclo. As lâminas totais aplicadas nos tratamentos estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Lâmina total e lâmina aplicada via irrigação por fase fenológica, para cada tratamento.

Tratamento	Fases fenológicas				Precipitação efetiva	Total
	Fase 0	Fase I	Fase II	Fase III		
	Lâmina aplicada					
	mm					
T1	69,33	39,67	67,39	72,7	41,09	249,09
T2	69,33	19,8	36,1	62,34	41,09	187,57
T3	69,33	10	27,6	49,23	41,09	156,16
T4	69,33	10	0	11,5	41,09	90,83

Fonte: autoria própria, 2025.

A partir dos dados e imagens obtidos em cada tratamento, foram calculadas médias da área foliar (AF), massa fresca (MF), massa seca (MS), tensão de água no solo (TAS), temperatura do dossel (TP), índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) e índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). No total foram realizadas 8 medições que ocorreram a partir do final da fase fenológica V4 para início de R5 (16/06/2022) até final de R8 (03/08/2022), com intervalos de aproximadamente 7 dias entre leituras. Os valores podem ser observados na Tabela 6.

De maneira geral, observou-se uma tendência de redução da massa fresca, massa seca e da área foliar à medida que a lâmina total aplicada diminuiu. Essa resposta evidencia a sensibilidade do feijoeiro ao déficit hídrico, sobretudo nos tratamentos com menor disponibilidade de água. Nota-se ainda que essa redução se acentuou nas quatro últimas semanas, atingindo seu ponto mais crítico na última data de avaliação. Ferreira *et al.* (2015) aplicaram PCA para caracterizar respostas

fisiológicas do feijoeiro sob déficit hídrico, mostrando que biomassa e área foliar se agrupam como principais descritores do crescimento.

Tabela 6 - Média dos tratamentos nas diferentes datas de avaliações e estádios fenológicos do feijoeiro

Medição (datas)	Estádio Fenológico	Tratamentos	AF	MF	MS	TAS	TP	IEHC	NDVI
			cm ²	g		kPa	°C		
16-Jun	R5	1	817,46	33,23	4,42	12,12	22,98	0,418	0,859
		2	829,33	36,95	5,40	11,71	22,85	0,582	0,832
		3	818,81	35,44	4,83	11,17	23,57	0,442	0,814
		4	811,44	36,53	4,63	11,16	22,80	0,524	0,814
23-Jun	R6	1	1108,15	54,69	7,29	12,13	24,15	0,477	0,933
		2	955,71	61,93	8,70	13,25	23,48	0,298	0,917
		3	780,99	41,48	5,74	14,37	22,87	0,670	0,905
		4	613,97	55,26	7,63	15,27	21,13	0,174	0,905
30-Jun	R7	1	1237,46	63,65	9,33	15,40	22,27	0,123	0,932
		2	1338,04	70,33	11,82	21,84	23,21	0,651	0,923
		3	923,15	74,24	12,37	34,80	22,87	0,733	0,910
		4	1172,51	77,72	12,72	40,00	22,08	0,425	0,909
7-Jul	R7	1	1406,2	107,16	18,07	15,16	22,00	0,125	0,907
		2	1408,43	89,58	15,04	16,89	22,43	0,190	0,909
		3	1552,1	72,90	13,80	19,35	22,98	0,632	0,914
		4	1636,07	55,05	10,36	70,05	25,24	0,859	0,888
14-Jul	R8	1	3305,65	169,55	29,09	13,21	22,29	0,126	0,906
		2	2313,06	118,44	21,15	20,60	22,26	0,387	0,910
		3	1995,57	108,31	20,88	51,49	24,03	0,419	0,903
		4	1361,3	73,29	14,16	62,69	25,72	0,559	0,854
21-Jul	R8	1	3247,87	268,86	44,37	12,66	22,59	0,058	0,948
		2	2234,93	173,80	29,24	25,07	24,13	0,380	0,933
		3	1737,18	136,36	23,07	44,57	24,36	0,323	0,919
		4	1499,5	112,64	20,63	68,78	27,23	0,663	0,844
28-Jul	R9	1	2945,68	287,61	51,65	15,05	23,03	0,166	0,906
		2	2204,67	176,27	33,64	20,82	22,66	0,135	0,906
		3	1789,46	183,79	39,97	47,54	24,93	0,295	0,894
		4	1021,66	82,27	19,88	85,97	28,30	0,556	0,692
3-Aug	R9	1	2643,49	260,62	46,80	12,67	22,24	0,106	0,938
		2	2174,41	238,07	49,57	14,44	23,74	0,181	0,895
		3	1841,74	204,53	47,00	46,64	24,64	0,174	0,792
		4	543,82	108,71	27,74	88,17	31,20	0,775	0,469

Fonte: autoria própria, 2025

As plantas correspondentes ao tratamento 4 apresentaram, a partir da quarta data de medição, maiores valores de temperatura de dossel em comparação com os demais tratamentos. Essa elevação da temperatura do dossel pode ser atribuída ao aumento da tensão de água no solo, pois nas medições anteriores ocorreram precipitações pluviais que não permitiram a diferenciação dos tratamentos. Esses

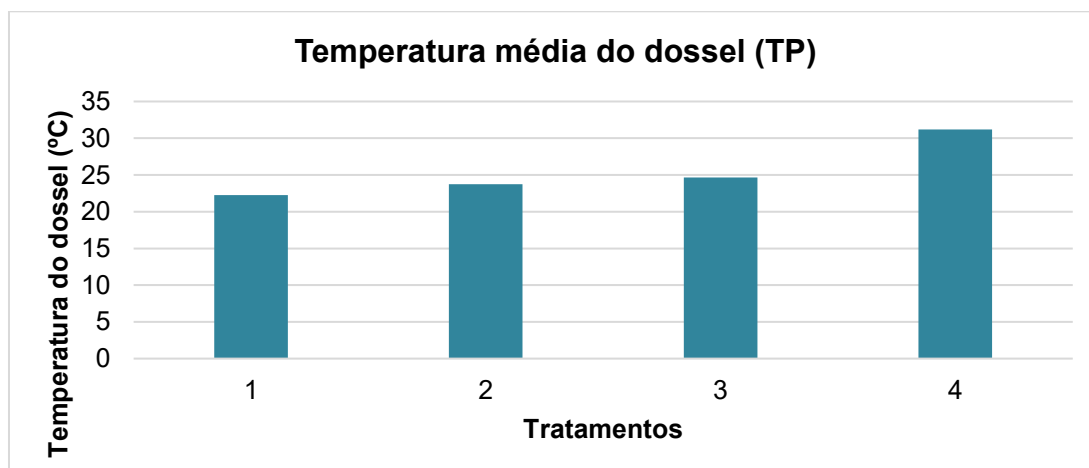
resultados sugerem que o maior intervalo entre as irrigações (T4) afetou negativamente a regulação térmica das plantas (Luan e Vico, 2021).

A temperatura das plantas (TP) refletiu de forma consistente o estado hídrico do feijoeiro ao longo do ciclo. Observou-se aumento da TP nos tratamentos submetidos às maiores tensões de água no solo, com destaque para o tratamento 4 (31,2 °C), indicando redução da transpiração. Segundo Jones (1999) e Taiz et al. (2017), o aumento da temperatura foliar é um indicativo direto de estresse hídrico, pois o fechamento estomático limita a perda de água, mas também compromete a fotossíntese e o transporte de assimilados, afetando negativamente o enchimento de grãos.

Esse efeito é corroborado pelos valores elevados do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC) no tratamento 4, que indicam limitação severa no potencial hídrico das plantas. Sob essas condições, o feijoeiro apresenta redução no número de vagens por planta, menor número de grãos por vagem e diminuição do peso de grãos, como observado neste estudo. Resultados semelhantes foram relatados por Nunes et al. (2016) e Silva et al. (2020), que destacam a sensibilidade do feijoeiro ao estresse hídrico prolongado, especialmente nas fases de florescimento e enchimento de grãos.

No Gráfico 1 tem-se a temperatura do dossel para os quatro tratamentos, na última medição. Nota-se o efeito do manejo hídrico sobre a temperatura da vegetação, sendo que intervalos maiores entre as irrigações (tratamento 4) resultaram em incidência de déficit hídrico e maior temperatura do dossel (31,2 °C), bem superior ao valor obtido com T1 (22,2 °C).

Gráfico 1 - Temperatura média do dossel (°C) nos tratamentos avaliados, correspondente à última data de avaliação



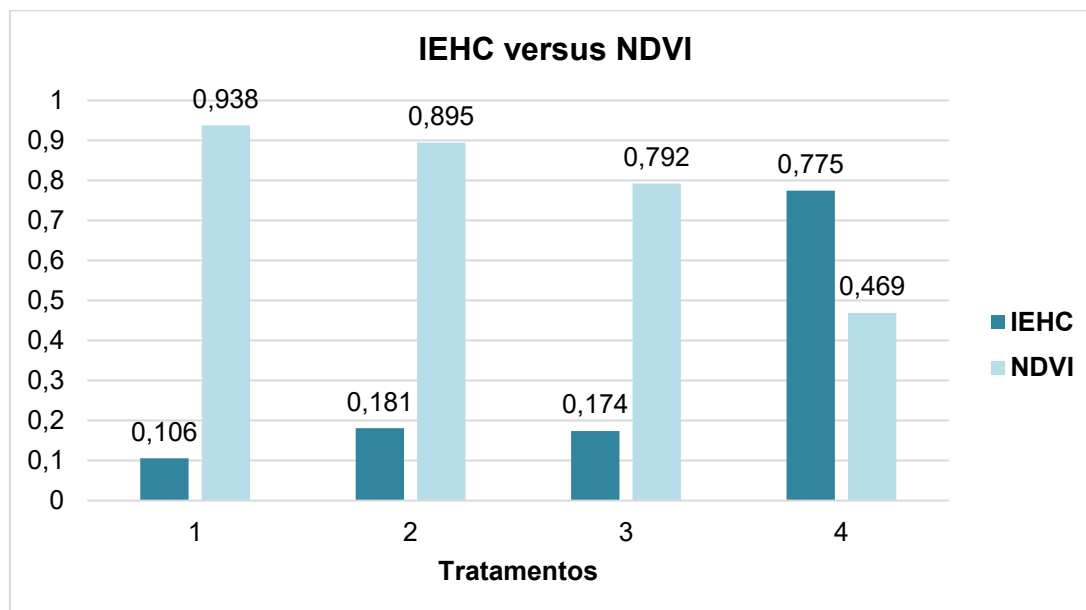
O Índice de Estresse Hídrico da Cultura (IEHC) apresentou variações significativas ao longo das datas de avaliação (Tabela 6), evidenciando padrões distintos nos diferentes tratamentos. De modo geral, os tratamentos 1 e 2 mantiveram valores mais baixos de IEHC em comparação aos tratamentos 3 e 4, especialmente a partir da quarta medição, que coincide com o final do estágio R6. Nesse período, o feijoeiro encontrava-se em plena fase reprodutiva, caracterizada pelo início da formação de vagens.

De acordo com Jackson *et al.* (1981), quando uma planta apresenta pouco ou nenhum estresse hídrico, ou seja, valores de IEHC próximos a zero, a temperatura foliar pode ser de 1 a 4°C menor em comparação com a temperatura do ar. No entanto, altos valores de CWSI indicam aumento no estresse hídrico nas plantas, sendo mais acentuado nos tecidos vegetais, o que pode ter implicado negativamente no desenvolvimento e desempenho destes tratamentos. Ramirez *et al.* (2015), aponta que quando uma cultura está sob estresse hídrico, os estômatos permanecem fechados e ocorre a redução gradativa da transpiração, o qual promove o aumento da temperatura foliar, podendo chegar até 4 a 6°C acima da temperatura do ar.

O NDVI apresentou valores semelhantes entre os tratamentos até a quarta leitura. A partir desse momento, os tratamentos que receberam lâminas de irrigação mais frequentes mantiveram valores mais elevados em comparação àqueles irrigados em intervalos maiores, evidenciando uma maior associação entre esse índice e o nível de conforto hídrico das plantas. Observou-se ainda uma tendência geral de decréscimo do NDVI ao longo do ciclo em todos os tratamentos, com redução mais acentuada a partir da sétima medição.

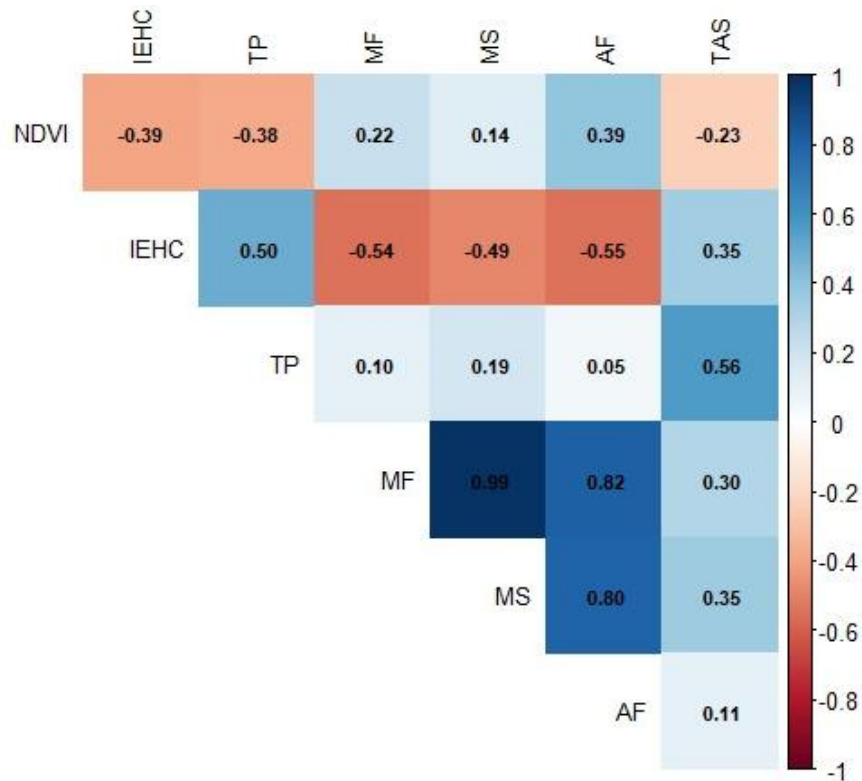
No Gráfico 2, tem-se os valores de IEHC e de NDVI para os tratamentos, na oitava medição. Verifica-se que T1 apresentou NDVI próximo de 1 (0,938), indicando vegetação densa e saudável, refletindo a luz no infravermelho próximo, justamente a banda que é utilizada na estimativa do NDVI, e absorvendo luz vermelha. O IEHC, por sua vez, foi de 0,106, próxima de 0, indicando ausência de estresse hídrico. Tais tendências dos dois índices também ocorreram nos tratamentos 2 e 3. No entanto, em T4 obteve-se NDVI de 0,469 e IEHC de 0,775, indicando estresse hídrico importante e comprometimento da disponibilidade hídrica para a atividade fotossintética.

Gráfico 2 - Valores de IEHC e de NDVI para cada tratamento, correspondentes à última data de avaliação (03/08/2022)



Segundo Ponzoni (2012), a redução do teor de água nas plantas acarreta alterações nas quantidades de proteínas e pigmentos, alterando o comportamento espectral, fazendo com que as plantas sejam menos aptas a absorver radiação eletromagnética na região visível e consequentemente aumentando a porcentagem de reflectância. No campo, também foi possível constatar que as plantas do tratamento 4 apresentaram entrada em senescência de forma antecipada em relação às demais. Bergamaschi (2007) ressalta que períodos prolongados de déficit hídrico podem afetar a fenologia das plantas, favorecendo a queda de folhas, flores e frutos, promovendo o que reduz o ciclo produtividade, consequentemente, a produtividade.

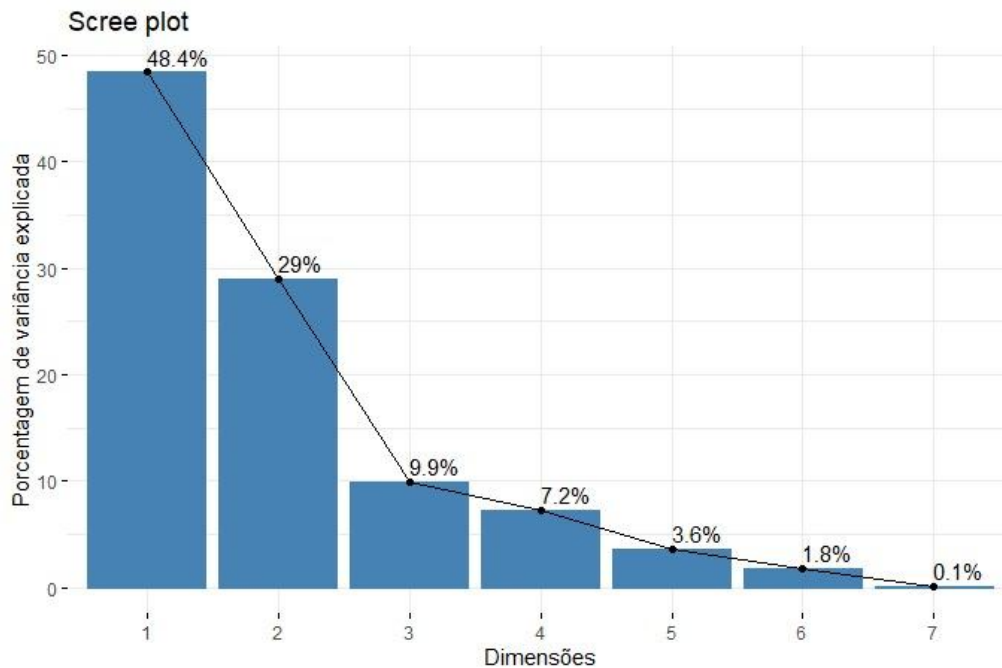
Ademais, foi realizada uma análise bivariável de correlação entre as variáveis, a qual pode ser visualizada por meio do gráfico do tipo correlograma. Nesta análise é possível avaliar se o coeficiente de Pearson entre duas variáveis é significativo ou não, além do grau de correlação, ou seja, através dos valores de correlação pode-se identificar quais variáveis estão mais relacionadas entre si e como essas relações podem influenciar o comportamento das plantas em diferentes tratamentos. O correlograma em questão pode ser observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Gráfico do tipo correlograma

Os resultados obtidos evidenciaram uma relação direta entre os parâmetros de crescimento de plantas. A MF apresentou uma correlação forte positiva com MS (0,99) e AF (0,82), uma vez que a expansão foliar promove maior acúmulo de biomassa. Barboza *et al.* (2023) observaram elevada acurácia do NDVI em estimar biomassa verde em feijão caupi.

Por sua vez, as variáveis relacionadas ao estresse hídrico apresentaram correlação negativa com crescimento. O índice de estresse da cultura (IEHC) apresentou uma correlação inversa moderada com MS, MF e AF, ou seja, quanto maior o estresse, menor o acúmulo de biomassa. Isso faz sentido, pois se tem uma associação positiva entre tensão da água no solo (TAS) e a temperatura foliar (TF), indicando que menor disponibilidade hídrica favorece o aumento de temperatura no dossel das plantas, reflexo do fechamento estomático.

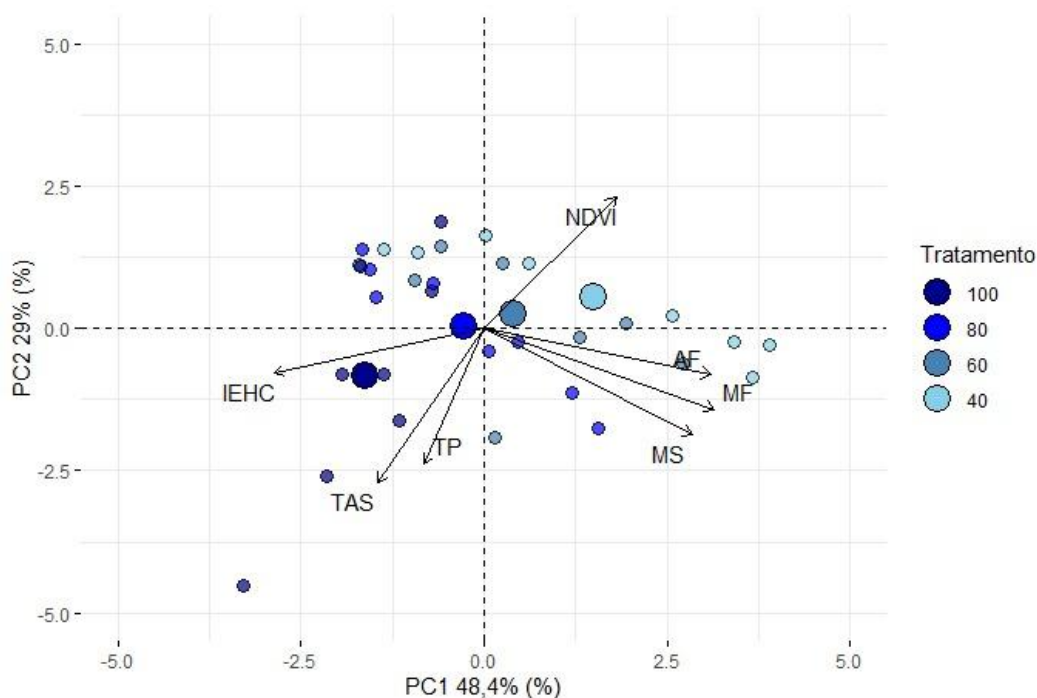
Foi gerado um gráfico “Scree Plot” (Gráfico 4), o qual é uma das maneiras de visualizar a porcentagem de variação explicada por cada componente principal (PC), também denominada de dimensão, dentro da variação total. Além disso, o scree plot também é utilizado para selecionar o número de PCs que devem ser usados com base no tamanho da variação explicada.

Gráfico 4 - Análise Scree Plot

No gráfico Scree Plot, nota-se que os componentes 1 e 2 representam 77,4% da variância, ou seja, a maior parte da informação dos dados já está contida nesses dois eixos. A partir do componente 3, a variância explicada cai de forma considerável (9,9%, 7,2%, 3,6%), indicando que essas dimensões têm contribuição menor para explicar os padrões principais. Observa-se que PC1 está associado fortemente a MF, MS e AF, componente que resume o crescimento e acúmulo de biomassa das plantas. Já o PC2 está relacionado ao NDVI em oposição o IEHC, TP e TAS, parâmetros que indicam estado fisiológico e hídrico das plantas.

Por conseguinte, foi gerado um gráfico do tipo biplot (Gráfico 5), o qual apresenta a associação das variáveis com os componentes principais escolhidos anteriormente. Dessa forma, é possível visualizar quais as variáveis que contribuem mais em cada dimensão. Além disso, o biplot permite analisar o comportamento de cada tratamento ao longo do período de avaliação do experimento.

Gráfico 5 - Análise Biplot



Neste gráfico, cada ponto representa um tratamento específico, e a cor do ponto indica a qual tratamento pertence, enquanto as setas representam as variáveis, indicando suas direções e intensidades em relação aos tratamentos. Além disso, as datas de medições estão representadas pelo tamanho dos pontos, variando do menor para o maior, o que nos permite visualizar a evolução das medições ao longo do tempo.

O gráfico evidencia a formação de dois eixos contrastantes: de um lado as variáveis de crescimento (MF, MS, AF e NDVI); e do outro, os índices de estresse (IEHC, TAS e TP). Os tratamentos com irrigações mais frequentes (T1 e T2) tendem a se posicionar mais à direita, enquanto tratamentos com maiores intervalos entre irrigações (T3 e T4) tendem a se concentrar mais próximos ao centro ou deslocados para baixo a esquerda, sugerindo maior relação com variáveis de estresse.

Os resultados dos componentes de produção, como produtividade de grãos (kg ha^{-1}), número de vagens por planta, número de grãos por vagens, peso de 100 grãos (g) e eficiência do uso da água (kg m^{-3}), correspondentes a cada tratamento, podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7- Componentes de produção e eficiência no uso da água para a cultura do feijoeiro

Tratamento	Vagens/ planta	Grãos/ vagem	Peso de 100 grãos	Peso das sementes/ 20 plantas	Produtividade	Lâmina Aplicada/ciclo	EUA
			g		kg ha ⁻¹	mm	kg m ⁻³
1	464	2351	26,01	606,98	4855,84	290,18	1,67
2	354	1873	25,84	491,1	3928,80	228,66	1,72
3	374	1898	24,56	489,68	3917,44	197,25	1,99
4	266	1087	20,46	226,46	1811,68	131,92	1,37

Fonte: autoria própria, 2025.

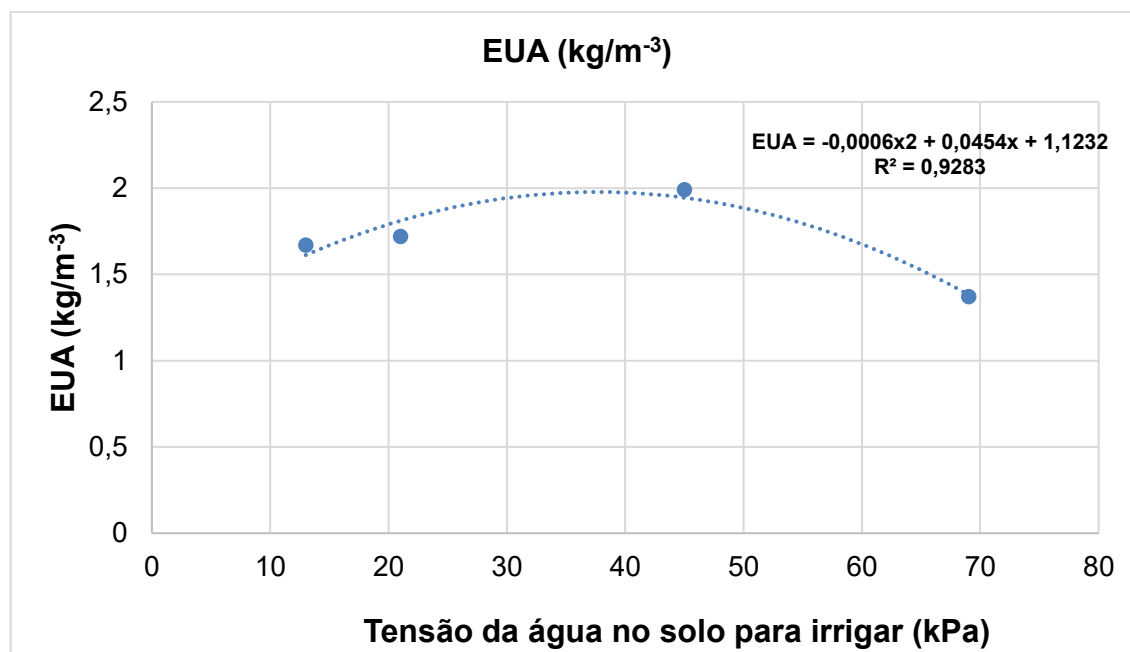
Os componentes de produção foram avaliados a partir de 16 plantas colhidas na área útil da parcela. Observou-se que o tratamento 1 apresentou os maiores valores em as variáveis de produção avaliadas. Os tratamentos 2 e 3 apresentaram desempenho semelhante, enquanto o tratamento 4 registrou os menores valores. Para Jadoski et al. (2003) a deficiência hídrica durante o período reprodutivo do feijoeiro promove alta taxa de abortamento de óvulos, o que, sem dúvida, reduz o número de grãos por vagem. A produtividade obtida neste estudo superou a média nacional de 1.110 kg ha⁻¹ (IBGE, 2021) e foi superior à reportada por Junqueira *et al.* (2004) no município de Jaboticabal – SP, onde foram alcançados 3.870 kg ha⁻¹ com a cultivar IAC-Carioca, cultivada em Nitossolo Vermelho Distroférrico sob condições ideais de adubação, irrigação e sanidade. Contudo, Santos *et al.* (2022), avaliando o coeficiente de produtividade da cultivar TAA Dama em ambiente controlado, registraram produtividade ainda mais elevada, de 4.983,20 kg ha⁻¹, no município de Botucatu – SP.

Do ponto de vista fisiológico, o feijoeiro é reconhecidamente sensível tanto ao déficit quanto ao excesso hídrico, especialmente durante os estádios reprodutivos (Doorenbos&Kassam, 1979; Taiz *et al.*, 2017). Em condições de maior disponibilidade de água no solo, como no tratamento 1, a baixa tensão hídrica favoreceu a expansão foliar, a manutenção da condutância estomática e a elevada taxa fotossintética, refletindo na maior produtividade (4.855,84 kg ha⁻¹). No entanto, a elevada lâmina total aplicada (290,18 mm) reduziu a eficiência do uso da água, indicando que parte da água disponibilizada não foi convertida em rendimento, possivelmente devido a perdas por evaporação, percolação profunda e lixiviação de nutrientes, conforme discutido por Allen et al. (1998) e Pereira et al. (2012).

O tratamento 3, por sua vez, apresentou uma lâmina total aplicada (197,25 mm), associada a um regime de irrigação mais restritivo, porém suficiente para atender às demandas fisiológicas essenciais da cultura. Nessas condições, o feijoeiro tende a ajustar o controle estomático, reduzindo a transpiração sem comprometer significativamente a assimilação de carbono, o que resulta em maior eficiência intrínseca do uso da água (Flexas *et al.*, 2004; Chaves *et al.*, 2009). Esse comportamento explica a manutenção da produtividade em níveis intermediários ($3.917,44 \text{ kg ha}^{-1}$) e o incremento expressivo da EUA observado neste tratament

A eficiência do uso da água (EUA) do feijoeiro apresentou resposta quadrática em função da tensão de água no solo (Gráfico 6), com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,93$), evidenciando que níveis intermediários de disponibilidade hídrica proporcionaram melhor aproveitamento da água aplicada. O maior valor de EUA foi observado no tratamento 3 ($1,99 \text{ kg m}^{-3}$), associado a uma tensão de irrigação próxima a 40 kPa, o que indica que o déficit hídrico moderado favoreceu a conversão da água em produtividade, mesmo sem resultar na maior produção absoluta de grãos.

Gráfico 6 - Eficiência do uso da água em função da tensão de água no solo



Dessa forma, os resultados evidenciam que o manejo da irrigação do feijoeiro baseado na tensão de água no solo é uma estratégia eficiente para maximizar a eficiência do uso da água, reforçando o potencial do déficit hídrico controlado como ferramenta para o manejo sustentável da irrigação do feijoeiro.

5 CONCLUSÕES

As variáveis associadas ao estresse hídrico apresentaram forte correlação negativa com os parâmetros de crescimento, confirmando que plantas submetidas a déficit hídrico severo têm sua produtividade final significativamente reduzida. Os valores de NDVI próximos a 1 concentraram-se nos tratamentos 1 e 2; contudo, observou-se tendência de decréscimo desse índice ao longo de todo o ciclo da cultura, independentemente do tratamento. Por sua vez, os maiores valores de IEHC foram registrados no tratamento 4, ao final da fase fenológica R6, momento em que as plantas se encontravam em plena fase reprodutiva.

Apesar do tratamento 1 ter apresentado a maior produtividade, a melhor eficiência do uso da água (EUA) foi observada no tratamento 3, correspondente à faixa de tensão de 30 a 50 kPa, intervalo que abrange os valores amplamente utilizados como critério de manejo da irrigação do feijoeiro.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a utilização integrada de índices espectrais e variáveis fisiológicas representa uma abordagem promissora para avaliar os efeitos do déficit hídrico sobre o crescimento das plantas. Essa integração contribui não apenas para a compreensão dos processos fisiológicos envolvidos, mas também fornece subsídios técnicos para a adoção de práticas de manejo mais eficientes, sustentáveis e alinhadas à necessidade de maior resiliência dos sistemas agrícolas frente às limitações hídricas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 2007.
- ALVARES, C. A. *et al.* Sensoriamento remoto no mapeamento de falhas de plantio em cana-de-açúcar. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO**, 2008. Anais [...]. p. 467-481.
- AMBROSANO, E. J. *et al.* Efeito do nitrogênio no cultivo de feijão irrigado no inverno. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, n. 2-3, p. 338-392, 1996.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MASCHIO, R.; SILVA, E. M. **Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2007. (Comunicado Técnico, 197).
- ASSAIANETE, B. A. S.; CAVICHIOLI, F. A. **A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) na cultura de cana-de-açúcar**. Interface Tecnológica, v. 17, n. 1, p. 444-455, 2020.
- AYANLADE, A. Remote sensing vegetation dynamics analytical methods: a review of vegetation indices techniques. **Geoinformatica Polonica**, v. 16, p. 11-17, 2017.
- BARBOZA, T. O. C. *et al.* Performance of vegetation indices to estimate green biomass accumulation in common bean. **AgriEngineering**, v. 5, n. 2, p. 840-854, 2023.
- BERGAMASCHI, H. O clima como fator determinante da fenologia das plantas. In: REGO, G. M.; NEGRELLE, R. R. B.; MORELLATO, L. P. C. (org.). **Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. p. 412.
- BERNARDI, A. C. C. *et al.* **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 58-73.
- BIAN, J. *et al.* Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery. **Remote Sensing**, v. 11, p. 267-284, 2019.
- BINOTTI, F. F. S. *et al.* **Manejo do solo e da adubação nitrogenada na cultura de feijão de inverno e irrigado**. Bragantia, v. 66, n. 1, p. 121-129, 2007.
- BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A cultura. In: CARNEIRO, J. E. S.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. (org.). **Feijão: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015. p. 9-15.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. **Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, n. 2, p. 317-323, 2001.

BUCKS, D. A. *et al.* **Trickle irrigation management for grape production.** In: THIRD INTERNATIONAL DRIP/TRICKLE IRRIGATION CONGRESS, 1985, Fresno. Proceedings [...]. Fresno: ASAE, 1985. p. 204-211.

CALOU, V. B. C. *et al.* **Classificação de imagem obtida por meio de VANT para monitoramento da aplicação de herbicidas na cultura do sorgo.** Ensaios nas Ciências Agrárias e Ambientais, v. 3, p. 60-67, 2017.

CALVACHE, A. M.; REICHARDT, K.; MALAVOLTA, E.; BACCHI, O. O. S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso da água em cultura do feijão. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, n. 3, p. 232-240, 1997.

CAMARGO, A. P.; GROHMANN, F.; CAMARGO, M. B. B. **Tensiômetro simples de leitura direta.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 17, n. 12, p. 1963-1972, 1982.

CAMPBELL, G. S.; MULLA, D. J. **Measurement of soil water content and potential.** In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (ed.). Irrigation of agricultural crops. Madison: ASA, 1990. p. 127-141.

CARNEIRO, G. E. S. **Desenvolvimento de novas cultivares para o agronegócio do feijão.** Brasília: Embrapa Soja, 2006. (Documentos, 308).

CARVALHO, A. J. de; GUERRA, J. V. S.; *et al.* **Eficiência do uso da água pelo feijoeiro em sistemas de plantio direto e convencional no semiárido mineiro.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C.; GUERRA, J. G. M. **Eficiência do uso da água na cultura do feijoeiro sob diferentes manejos de irrigação.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 405–412, 2009.

CHAI, Q. *et al.* **Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress: a review.** *Agronomy for Sustainable Development*, v. 36, n. 1, p. 3, 2016.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. **Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell.** *Annals of Botany*, Oxford, v. 103, n. 4, p. 551–560, 2009.

COELHO, A. P.; ROSALEN, D. L.; FARIA, R. T. **Vegetation indices in the prediction of biomass and grain yield of white oat under irrigation levels.** *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 48, n. 2, p. 109-117, 2018.

COUTO, L. **Effects of water stress on growth, reproductive development, dry matter partitioning, and yield components of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in the field.** *Dissertation Abstracts International. B Sciences Engineering*, Ann Arbor, v. 394, p. 56-95, 1979.

CREPANI, E.; SANTOS, A. R. **Erosion of the Upper Taquari Basin and the sediment accumulation in the Pantanal Mato-Grossense**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF RESOURCE AND ENVIRONMENTAL MONITORING, 1994, Rio de Janeiro. Proceedings [...]. Rio de Janeiro: ISPRS, 1994. p. 105-110.

CRUSIOL, L. G. T. *et al.* **Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento do déficit hídrico na cultura da soja**. In: XII JORNADA ACADEMICA DA EMBRAPA SOJA, 2017. Anais [...].

CUNHA, P. C. R. **Manejo da irrigação do feijoeiro cultivado em plantio direto no sistema integração lavoura-pecuária**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA; NOVA, T. B. **Manejo correto garante a qualidade do feijão**. *Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação*, 17 abr. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa/CNPSo, 1999. 306 p.

FARIA, R. M. **Produção e fisiologia do feijoeiro sob déficit hídrico em semeadura direta e convencional**. 2021. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

FRANCO, José Rafael; DAL PAI, Enzo; CALÇA, Marcus Vinícius Contes; RANIERO, Matheus Rodrigues; DAL PAI, Alexandre; SARNIGHAUSEN, Valeria Cristina Rodrigues; SÁNCHEZ-ROMÁN, Rodrigo Máximo. **Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP**. *Irriga, Botucatu*, v. 28, n. 1, p. 77–92, jan./mar. 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n1p77-92.

FERNANDES, P. **Estimativa da produtividade de milho (*Zea mays* L.) através de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado**. Santa Maria, RS, 2016.

FIGUERÊDO, S. F. **Estabelecimento do momento de irrigação com base na tensão da água no solo para a cultura do feijoeiro**. 1998. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.

FREITAS, F. O. **Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão comum no Brasil**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 41, n. 7, p. 1199-1203, 2006.

GALVÃO, L. S. *et al.* **Crop type discrimination using hyperspectral data**. In: THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G.; HUETE, A. (ed.). *Biophysical and biochemical characterization and plant species studies*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. p. 183-210.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 70-75, 2006.

HAVEN, J. *et al.* Photoinhibition and drought in Mediterranean woody plants: independent or interactive effects? **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 193-203, 2007.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Brasília: IBGE, 2019.

IDSO, S. B. *et al.* **Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability**. *Agricultural Meteorology*, v. 24, p. 45-55, 1981.

IHUOMA, S. O.; MADRAMOOTOO, C. A. **Recent advances in crop water stress detection**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 141, p. 267-275, 2017.

JACKSON, R. D. *et al.* Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1133-1138, 1981.

LEON, J. Fundamentos botânicos de los cultivos tropicales. San José: IICA, 1968. 487 p.

JONES, H. G. **Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a practical tool for irrigation scheduling**. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 95, n. 1-2, p. 1-15, 1999.

LOPEZ, J. R. *et al.* **Integrating growth stage deficit irrigation into a process-based crop model**. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 243, p. 84-92, 2017.

LÓPEZ-LÓPEZ, R. *et al.* **Índice de XXestrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)**. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, v. 15, n. 3, p. 259-267, 2009.

LUAN, X.; VICO, G. **Canopy temperature and heat stress are increased by compound high air temperature and water stress and reduced by irrigation: a modeling analysis**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, p. 1411-1423, 2021.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fotossíntese**. In: FERRI, M. G. (ed.). *Fisiologia vegetal*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2009. p. 125-156.

MEDEIROS, G. A.; DANIEL, L. A.; LUCARELLI, J. R. F. **Eficiência do uso da água do feijoeiro irrigado: influência do sistema de preparo do solo**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABRH, 1999.

MORIYA, E. A. S. **Identificação de bandas espectrais para detecção de cultura de cana-de-açúcar sadia e doente utilizando câmara hiperespectral embarcada**

em VANT. 2015. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – UNESP, Presidente Prudente, 2015.

MUNOZ-PEREA, C. G. *et al.* **Water use efficiency among dry bean landraces and cultivars in drought-stressed and non-stressed environments.** *Euphytica*, Wageningen, n. 155, p. 393-402, 2007.

NUNES, A. C.; MELO, L. B.; CARDOSO, A. F.; FERREIRA, E. P. B. **Componentes de produção do feijoeiro sob déficit hídrico.** *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 11, n. 4, p. 321–328, 2016.

OLIVEIRA, L. F. C. *et al.* **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos.** 2. ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. 61 p.

PAM – **Produção Agrícola Municipal.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/2046-np-producao-agricola-municipal/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 15 set. 2025.

PEREIRA, G. M.; SILVA, M. L. O.; FERREIRA, R. S. **Manejo da irrigação do feijoeiro com base no potencial matricial do solo.** *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 15, n. 3, p. 1–10, 2021.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past, present and future. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 147, p. 4–20, 2015.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176 p.

QUINTEIRO, J. M. O. *et al.* Feijão. In: RODRIGUES, J. D.; NASS, L. L.; PATERNIANI, E. (org.). **Plantas alimentícias não convencionais (PANC) no Brasil.** Campinas: Instituto Agrônômico, 2018. p. 119-134.

RAMÍREZ, A. J. F. *et al.* **Determinação do índice de estresse hídrico em tomateiros cereja (*Lycopersicum solanum* var. cerasiforme) com câmara infravermelha.** *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 9, n. 4, p. 218-224, 2015.

ROSENDO, J. S.; ROSA, R. **A utilização de sensores com resolução moderada (MODIS) no estudo da vegetação na bacia do rio Araguari-MG.** *Sociedade & Natureza*, v. 17, n. 33, p. 91-104, 2005.

SALVADOR, C. A.; PEREIRA, J. R. **Prognóstico agropecuário: feijão.** Departamento de Economia Rural – DERAL, v. 13, n. 36, 2021.

SAMPAIO, M. I. R. *et al.* Análise dos índices de vegetação NDVI e NDRE em imagens obtidas por meio de sensor embarcado em um RPAS para as culturas da

soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*) irrigados. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 9, n. 4, p. 350-362, 2021.

SANDRINI, F. O. T. *et al.* Índices de vegetação na estimativa da produtividade do feijoeiro cultivado sob doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, p. 1-8, 2019.

SANTOS, F. A. S.; LIMA, A. R. **Características produtivas de diferentes cultivares de feijão no município de Cáceres-MT**. Centro Científico Conhecer, v. 11, n. 21, p. 408-420, 2015.

SHIRATSUCHI, L. S. *et al.* **Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão**. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (org.). Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 58-73.

SILVA, A. L.; SANTOS, D. P.; OLIVEIRA, E. C. **Estresse hídrico e rendimento do feijoeiro em diferentes estádios fenológicos**. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 50, e61234, 2020.

SILVA, A. F. *et al.* **Efeito do estresse hídrico na cultura do feijão** (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 13, n. 2, p. 166-175, 2019.

SILVA, M. A. *et al.* Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **The Journal of Agricultural Science**, v. 152, n. 1, p. 104-118, 2012.

SILVA, M. G. *et al.* **Manejo do solo e adubação nitrogenada em feijoeiro de inverno**. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 61, n. 3, p. 307-312, 2004.

SOARES, L. A. *et al.* Estratégias de irrigação com déficit hídrico nos estádios fenológicos do feijão-caupi sob adubação potássica. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 1, p. 111-122, 2021.

SOUZA, E. J.; MANTOVANI, E. C.; DELAZARI, F. T.; SILVA, A. A. **Manejo da irrigação do feijoeiro considerando precipitação efetiva**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 23, n. 6, p. 421-428, 2019.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVA, S. C. **Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 23, n. 2, p. 161-167, 1988.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. Q. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. Goiânia: Embrapa-CNPAF, 1995. 49 p. (Documentos, 55).

TÁVORA, F. J. A. F.; DINIZ, B. L. M. T. **Cultura do feijão comum** (*Phaseolus vulgaris* L.). Fortaleza: UFC, 2006. Disponível em: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAAvDsAF/cultura-feijao>. Acesso em: 15 set. 2025.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. **Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards**. In: TEIXEIRA, P. C. *et al.* (org.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 574.

UCLA: STATISTICAL CONSULTING GROUP. **A practical introduction to factor analysis**. Disponível em: <https://stats.oarc.ucla.edu/spss/seminars/introduction-to-factor-analysis/a-practical-introduction/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VILHORDO, B. W. *et al.* Morfologia. In: ARAÚJO, R. S. *et al.* (org.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. p. 71-99.

WIEDENFELD, R. P.; ENCISO, J. M. **Sugarcane responses to irrigation regimes in the lower Rio Grande Valley of Texas**. *Agronomy Journal*, Madison, v. 100, n. 5, p. 1365–1372, 2008.

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. **Journal of Sensors**, v. 2017, p. 1-17, 2017.

ZANZARINI, F. V. *et al.* Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

ZHAO, A. *et al.* **Responses of vegetation productivity to multiscale drought in Loess Plateau, China**. *Catena*, v. 163, p. 165-171, 2018.