

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal

Wagner Fabian Gonçalves Santos

**Produção de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) sob diferentes níveis de água disponível
no solo**

Montes Claros
2025

Wagner Fabian Gonçalves Santos

Produção de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) sob diferentes níveis de água disponível no solo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Alcinei Místico Azevedo

Coorientador: Prof. Dr. Cândido Alves da Costa

Montes Claros
2025

Santos, Wagner Fabian Gonçalves.

S237p
2025

Produção de grão-de-bico (*Cicer arietinum L.*) sob diferentes níveis de água disponível no solo [manuscrito]/ Wagner Fabian Gonçalves Santos. Montes Claros, 2025.

98 f.: il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Alcinei Místico Azevedo

Banca examinadora: Cândido Alves da Costa, Edson de Oliveira Vieira, Luiz Arnaldo Fernandes, Nelson Licínio Campos Oliveira, José Carlos Fialho de Resende.

Inclui referências: f. 34-40; 64-67; 93-95.

1. Déficit hídrico -- Teses. 2. Agricultura de regiões áridas -- Teses. 3. Produtividade agrícola -- Teses. 4. Eficiência do uso da água -- Teses. 5. Grão-de-bico -- BRS Aleppo -- Teses. 6. Grão-de-bico -- BRS Toro -- Teses. 7. Pulse (Leguminosa) -- Teses. 7. Coeficiente da cultura -- Teses. I. Místico, Alcinei Azevedo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 633.35: 626.8

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 05 dias do mês de dezembro de 2025 às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Alcinei Místico Azevedo, D. Sc. (Orientador - UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Cândido Alves da Costa, D. Sc. (Coorientador - UFMG/ICA), Edson de Oliveira Vieira, D. Sc. (UFMG/ICA), Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (UFMG/ICA), Nelson Licínio Campos Oliveira, D. Sc. (IFNMG) e de José Carlos Fialho Rezende, D. Sc. (EPAMIG), reuniu-se, presencialmente, a Banca de tese de **Wagner Fabian Gonçalves Santos**, aluno do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: **“Produção de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) sob diferentes níveis de água disponível no solo”** sendo o aluno considerado **APROVADO**. E, para constar, eu, Professor Alcinei Místico Azevedo, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do **ARTIGO 65** do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 65 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.


Montes Claros, 05 de dezembro de 2025.


Alcinei Místico Azevedo (ICA-UFMG)
 Orientador

Cândido Alves da Costa (ICA-UFMG)
 Coorientador

Edson de Oliveira Vieira (ICA-UFMG)
 Membro

Luiz Arnaldo Fernandes (ICA-UFMG)
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **NELSON LICINIO CAMPOS DE OLIVEIRA**
 Data: 06/12/2025 12:35:07-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **JOSE CARLOS FIALHO DE RESENDE**
 Data: 05/12/2025 19:22:11-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Nelson Licínio Campos Oliveira (IFNMG)
 Membro

José Carlos Fialho de Resende (EPAMIG)
 Membro

Dedico à minha esposa, Soraya Mesquita, e aos meus filhos, João Pedro e Rodrigo, pelo apoio, dedicação, incentivo em todos os momentos e projetos da minha jornada, por acreditarem no meu potencial e pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta tese marca uma etapa importante em minha trajetória acadêmica. Agradeço a Deus pelas oportunidades, bênçãos e constante orientação, que me permitiram alcançar essa significativa conquista.

Sou profundamente grato ao meu coorientador, Dr. Cândido Alves da Costa, pelos ensinamentos, pela confiança, pelo apoio firme, pelos sábios conselhos e pela parceria ao longo de toda essa jornada. Agradeço por acreditar no sucesso do nosso trabalho.

À minha companheira de vida, Soraya Mesquita, agradeço pelo amor, apoio incondicional e presença constante nos momentos difíceis. Que possamos juntos celebrar todas as conquistas que ainda virão.

Sou grato ao professor Luiz Arnaldo Fernandes pelas contribuições valiosas e sugestões aplicadas à metodologia deste trabalho.

Agradeço, também, à colega Aline e ao meu filho João Pedro Mesquita pelo apoio e incentivo durante toda a realização das atividades.

Aos colegas de curso, registro minha gratidão pela parceria, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio mútuo nos momentos desafiadores, tornando essa caminhada mais leve e enriquecedora.

Meu sincero reconhecimento estende-se, igualmente, aos colegas de trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG (ICA/UFMG), agradeço pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

Aos órgãos de fomento FAPEMIG, CNPq e CAPES, meu agradecimento pelo suporte financeiro essencial para a execução desta pesquisa.

A todos, deixo minha eterna gratidão.

PRODUÇÃO DE GRÃO-DE-BICO (*CICER ARIETINUM* L.) SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA DISPONÍVEL NO SOLO

RESUMO

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) destaca-se entre as leguminosas cultivadas mundialmente. No Brasil, seu potencial produtivo é elevado, mas há poucas informações sobre manejo hídrico e tolerância ao estresse. Este estudo avaliou a produtividade e as características morfológicas de duas cultivares de grão de bico, 'BRS Aleppo' e 'BRS Toro', sobre diferentes níveis de umidade no solo. O experimento, conduzido em Montes Claros, seguiu um esquema fatorial 2 × 4 (duas variedades × quatro níveis de água disponível: 50%, 60%, 70% e 80%), com delineamento em blocos e três repetições. Foram analisadas características como altura de plantas, produção, índice de colheita, número de vagens, massa fresca e seca das raízes e parte aérea, e diâmetro do caule. O aumento da disponibilidade de água no solo de 50% para 80% da capacidade de campo aumentou significativamente o número e o peso das vagens nas duas cultivares de grão-de-bico, durante os estádios vegetativo e reprodutivo inicial. No entanto, o peso das sementes por planta não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, sugerindo que limitações fisiológicas e ambientais restringem o peso final das sementes, apesar do aumento na formação de vagens. Esses resultados ressaltam a importância do manejo preciso da água, principalmente, durante as fases críticas de crescimento e destacam a alta tolerância à seca de ambas as cultivares. A cultivar 'BRS Aleppo' demonstrou maior eficiência no uso da água e produtividade, indicando sua melhor adaptação a condições semiáridas.

Palavras-chave: estresse hídrico; produtividade agrícola; eficiência no uso da água; 'BRS Aleppo'; 'BRS Toro'.

CHICKPEA PRODUCTION UNDER DIFFERENT LEVELS OF AVAILABLE SOIL WATER

ABSTRACT

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) stands out among legumes cultivated worldwide. In Brazil, its productive potential is high, but there is little information on water management and stress tolerance. This study evaluated the productivity and morphological characteristics of two chickpea cultivars, 'BRS Aleppo' and 'BRS Toro', under different soil moisture levels. The experiment, conducted in Montes Claros, followed a 2×4 factorial design (two varieties \times four levels of available water: 50%, 60%, 70%, and 80%), with a randomized complete block design and three replications. Characteristics such as plant height, yield, harvest index, number of pods, fresh and dry mass of roots and shoots, and stem diameter were analyzed. Increasing soil water availability from 50% to 80% of field capacity significantly increased the number and weight of pods in two chickpea cultivars, 'BRS Aleppo' and 'BRS Toro', during the vegetative and early reproductive stages. However, seed weight per plant remained constant across treatments, suggesting that physiological and environmental limitations restrict final seed weight despite increased pod formation. These results highlight the importance of precise water management, especially during critical growth phases, and emphasize the high drought tolerance of both cultivars. The 'BRS Aleppo' cultivar demonstrated greater water use efficiency and productivity, indicating its better adaptation to semi-arid conditions.

Keywords: *Cicer arietinum* L.; water stress; agricultural productivity; water use efficiency; 'BRS Aleppo'; 'BRS Toro'.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	09
2.	OBJETIVO.....	11
2.1	Objetivo Geral.....	11
2.2	Objetivos Específicos.....	11
3.	CAPÍTULO I.....	12
3.1	Revisão de Literatura.....	12
3.1.1	Produção de Grão-De-Bico: Uma Revisão	12
4.	CAPÍTULO II	42
4.1	Artigo 1 - Determinação do Coeficiente de Cultivo de Duas Variedades de Grão-de-Bico no Norte de Minas Gerais.....	42
5.	CAPÍTULO III	69
5.1	Artigo 2 - Produção de Grão-de-Bico sob Diferentes Níveis de Água Disponível no Solo.....	69
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97

1. INTRODUÇÃO GERAL

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma leguminosa cultivada em época fria, sob temperaturas amenas, destacando-se pela sua tolerância à seca. Em regiões semiáridas, como o Norte de Minas Gerais, a baixa precipitação, o aumento da temperatura e a diminuição da umidade do solo podem comprometer o desempenho da cultura. Essa espécie exige baixa quantidade de água; estima-se que a necessidade hídrica seja de até 410 mm por ciclo, embora não existam ainda estudos científicos que confirmem tal estimativa. Trata-se de planta adaptada a sistemas não irrigados, com raízes profundas, que alcançam camadas inferiores do solo (Nascimento et al., 2016; Queiroga et al., 2021).

A produtividade do grão-de-bico é influenciada por fatores bióticos e abióticos, entre os quais a disponibilidade hídrica e a capacidade de retenção de água no solo após as chuvas destacam-se como cruciais para o aumento da produção vegetal. O déficit hídrico pode limitar todas as fases do desenvolvimento vegetal, visto que a água, responsável por até 95% da biomassa fresca, é essencial para processos como crescimento, metabolismo, fotossíntese e regulação térmica (Brodersen et al., 2019), ou seja, consiste na escassez prolongada de água, capaz de reduzir o desempenho da planta em todas as fases fenológicas (Bittencourt; Silva, 2018). Durante esse período, o fluxo de água pelo xilema é afetado, ocorrendo a formação de embolismos que reduzem a condução de seiva. Tal disfunção hidráulica limita as atividades fisiológicas e pode conduzir à morte vegetal (Zipper; Qiu; Kucharik, 2016). Além disso, fatores como luz, temperatura, salinidade e CO₂ influenciam o desenvolvimento do grão-de-bico.

Para enfrentar esses desafios, as plantas ativam diversos mecanismos adaptativos, dentre os quais o fechamento estomático representa a resposta inicial. Posteriormente, ocorrem ajustes morfológicos e bioquímicos, como acúmulo de carboidratos, ativação de aquaporinas, ajuste osmótico e síntese de compostos protetores, incluindo açúcares, proteínas LEA, prolina, chaperonas térmicas e antioxidantes (Bianchi et al., 2016).

Por ser uma espécie rústica, o grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) tem despertado crescente interesse devido ao seu potencial produtivo e valor nutricional, especialmente pelo elevado teor proteico. com baixa incidência de pragas e doenças, e boa tolerância ao déficit hídrico, o que a torna promissora para cultivo em regiões tropicais e semiáridas, com resultados produtivos expressivos no cerrado brasileiro.

Atualmente, a agricultura enfrenta o desafio de manter a produtividade sem comprometer os recursos naturais. A elevada demanda por alimentos, os impactos das

mudanças climáticas e a necessidade de reduzir o uso desnecessário de água e o consumo energético estimulam a adoção de práticas sustentáveis.

Embora contribua para sistemas de produção sustentáveis, como outras leguminosas, o grão-de-bico ainda é pouco explorado no Brasil, com escassez de informações sobre cultivares adaptadas e sua necessidade hídrica ao longo do ciclo produtivo. Poucos estudos abordam a demanda hídrica da cultura em ambientes tropicais.

Dessa forma, é fundamental identificar e caracterizar variedades adaptadas a regiões semiáridas brasileiras e quantificar a demanda hídrica de cada variedade. Esse conhecimento é decisivo para o desenvolvimento de espécies ajustadas às condições tropicais, favorecendo cultivos mais eficientes e sustentáveis.

Neste estudo, parte-se da hipótese de que diferentes variedades de grão-de-bico apresentam comportamento distinto quanto à necessidade hídrica. O objetivo principal foi avaliar o desempenho produtivo de duas cultivares, 'BRS Aleppo' e 'BRS Toro', cultivadas em vasos de 20 litros, sob quatro níveis de disponibilidade hídrica no solo (50%, 60%, 70% e 80%) da capacidade de campo.

O estudo visa a compreender os padrões de crescimento e produção das duas cultivares testadas no Norte de Minas Gerais, em Montes Claros, observar sua tolerância ao déficit hídrico e fornecer dados precisos que subsidiem práticas de manejo hídrico sustentável para o cultivo do grão-de-bico na região.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o padrão de crescimento, o desenvolvimento morfológico e fisiológico, bem como a produtividade do grão-de-bico sob diferentes níveis de disponibilidade de água no solo.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar o coeficiente de cultivo das duas cultivares de grão-de-bico, BRS Toro e BRS Aleppo, por meio da aplicação de um modelo matemático de evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Montes Claros no Norte de Minas Gerais, utilizando o método padrão FAO de Penman-Monteith.
- Fornecer subsídios científicos para práticas de manejo hídrico sustentável no cultivo do grão-de-bico para região de Montes Claros no Norte de Minas Gerais, promovendo a otimização do uso da água e o aumento da produtividade agrícola.
- Avaliar o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do grão de bico.

3. CAPÍTULO I

3.1 Revisão de literatura

3.1.1 Produção de grão-de-bico: uma revisão

RESUMO

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma leguminosa de grande importância para a segurança alimentar, especialmente, em regiões semiáridas onde a disponibilidade hídrica é limitada. Esta tese investiga as respostas fisiológicas da cultura ao déficit hídrico e a relação entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e o coeficiente de cultivo (K_c) para subsidiar práticas de manejo hídrico mais eficientes. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método Penman-Monteith, adotado pela FAO, e calibrada para condições regionais com dados meteorológicos locais e características fenológicas específicas da cultura. Os resultados mostram que a aplicação correta do K_c, considerando as fases do desenvolvimento da planta e as condições climáticas locais, permite otimizar o uso da água, reduzir o estresse hídrico e aumentar a produtividade do grão-de-bico. Além disso, o estudo destaca a importância de pesquisas regionalizadas para a definição precisa dos coeficientes de cultivo fundamental para o planejamento da irrigação sustentável em sistemas agrícolas vulneráveis à escassez hídrica. A integração entre conhecimentos fisiológicos, agronômicos e ambientais é vista como essencial para promover a sustentabilidade econômica e ambiental do cultivo do grão-de-bico em ambientes semiáridos. Assim, esta pesquisa contribui para o aprimoramento do manejo hídrico, visando garantir a segurança hídrica e alimentar, e promover a resiliência da agricultura frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: *Cicer arietinum*; manejo hídrico; evapotranspiração; coeficiente de cultivo; déficit hídrico; semiárido; sustentabilidade agrícola.

CHICKPEA PRODUCTION: A REVIEW

ABSTRACT

The chickpea (*Cicer arietinum* L.) is a legume of great importance for food security, especially in semi-arid regions where water availability is limited. This thesis investigates the physiological responses of the crop to water deficit and the relationship between crop evapotranspiration (ET_c) and crop coefficient (K_c) to support more efficient water management practices. Reference evapotranspiration (ET_o) was estimated using the Penman-Monteith method, adopted by the FAO and calibrated for regional conditions based on local meteorological data and specific phenological characteristics of the crop. The results show that the correct application of K_c considering plant developmental stages and local climatic conditions, optimizes water use, reduces water stress, and increases chickpea productivity. Furthermore, the study highlights the importance of regionalized research for the precise definition of crop coefficients, which is fundamental for sustainable irrigation planning in agricultural systems vulnerable to water scarcity. The integration of physiological, agronomic, and environmental knowledge is seen as essential to promote the economic and environmental sustainability of chickpea cultivation in semi-arid environments. Thus, this research contributes to the improvement of water management, aiming to ensure water and food security, and to promote agricultural resilience in the face of climate change.

Keywords: *Cicer arietinum*; water management; evapotranspiration; crop coefficient; water deficit; semi-arid; agricultural sustainability.

INTRODUÇÃO

A agricultura enfrenta desafios crescentes, como as mudanças climáticas, o esgotamento dos recursos naturais, a perda da biodiversidade, a escassez de mão de obra e o aumento da demanda por alimentos, especialmente em países em desenvolvimento (Tariq et al., 2023). Em resposta a essas questões, têm sido adotadas tecnologias avançadas baseadas em fundamentos científicos e práticas de gestão com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva da cultura do

grão-de-bico, bem como promover o uso sustentável da terra, da água e de outros recursos, minimizando a interferência ambiental (Tariq et al., 2023)

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma leguminosa de grande relevância global para a segurança alimentar e a nutrição humana, devido ao seu alto valor proteico e à sua adaptabilidade a condições adversas. Seu cultivo tem se expandido significativamente em regiões de clima semiárido, onde a escassez hídrica impõe desafios severos à produção agrícola. Apesar da resistência relativa do grão-de-bico à seca, o déficit hídrico compromete processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese, absorção de nutrientes, crescimento radicular e produtividade final. Assim, o manejo eficiente da disponibilidade hídrica no solo torna-se imprescindível para assegurar o desenvolvimento adequado da cultura e a sustentabilidade da produção nessas regiões.

A evapotranspiração de referência (ET_o) e o coeficiente de cultivo (K_c) são parâmetros centrais para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), permitindo dimensionar, com precisão, as necessidades hídricas do grão-de-bico. O método Penman-Monteith, adotado pela FAO como padrão internacional, integra variáveis meteorológicas fundamentais para a estimativa da ET_o, ao passo que o K_c traduz as particularidades fisiológicas e fenológicas da planta em diferentes fases do ciclo produtivo.

A adaptação desses parâmetros às condições locais é vital para o planejamento irrigatório eficiente, minimizando perdas por estresse hídrico e otimizando o uso dos recursos hídricos. Quanto à importância social e econômica, o cultivo do grão-de-bico oferece oportunidades para diversificação agrícola e aumento da renda em regiões semiáridas brasileiras. No entanto, é necessária uma compreensão aprofundada das interações entre os fatores bióticos, abióticos que afetam a cultura, para o desenvolvimento de práticas agrícolas customizadas e sustentáveis.

Esta tese tem como objetivo investigar as respostas fisiológicas do grão-de-bico ao déficit hídrico, assim como a estimativa das necessidades hídricas por meio da evapotranspiração e sua relação com a produtividade, considerando as condições ambientais específicas de regiões semiáridas. Ademais, almeja-se contribuir para a otimização do manejo e a sustentabilidade do cultivo, promovendo o uso eficiente da água e a mitigação dos efeitos do estresse hídrico na cultura.

Aspectos Gerais do Grão-de-Bico

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) É uma espécie rica em proteínas e micronutrientes, contendo aminoácidos essenciais para a nutrição humana, com elevados teores de triptofano em

sua composição. Seu uso alimentar contribui significativamente para questões econômicas e sociais, especialmente, no combate à desnutrição, o que o torna um alimento versátil e economicamente vantajoso.

Produzido em mais de 50 países, os principais produtores são Austrália, Canadá, Etiópia, Índia, Irã, México, Mianmar, Paquistão, Turquia e Estados Unidos. O grão-de-bico é uma *commodity* em expansão, com comércio crescente em diversas regiões do mundo. A Índia é o maior país produtor e consumidor mundial, responsável por cerca de 75% da produção global (Gaur et al., 2019), cultivando, aproximadamente, 10,9 milhões de hectares e respondendo por 20% da produção global de leguminosas.

Apesar disso, a produtividade do grão-de-bico ainda é insuficiente para suprir as necessidades proteicas da população crescente. Em 2022, os principais países exportadores foram Austrália, Canadá e Índia, responsáveis por mais de 40% das exportações globais (USDA, 2024). No mesmo ano, a Índia produziu 13,4 milhões de toneladas, seguida pela Austrália com 10,6 milhões de toneladas. Considerado uma das leguminosas mais relevantes para a alimentação humana, o grão-de-bico destaca-se como fonte acessível de proteínas, especialmente em países em desenvolvimento.

Embora sua importância nutricional seja reconhecida, a produção mundial de grão-de-bico (11,90 milhões de toneladas) ainda é baixa, comparada a outras leguminosas, como a soja (120,70 milhões de toneladas) (FAO, 2025). No Brasil, a produção em 2023 alcançou 3,5 milhões de toneladas, enquanto o consumo estimado foi de aproximadamente oito milhões de toneladas. Os dois principais grupos comerciais explorados são Desi e Kabuli.

O Grão-de-Bico no Brasil

No Brasil, o grupo Kabuli é mais cultivado e aceito pela população, enquanto a grande demanda para exportação reside no grupo Desi. O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma leguminosa adaptada a climas frios e tropicais, apresentando baixa demanda hídrica e sendo passível de mecanização (Costa et al., 2023). Sua introdução no Brasil ocorreu por imigrantes espanhóis e do Oriente Médio (Rao et al., 2010), com expansão das áreas produtivas no bioma cerrado a partir de 2013, apoiada por pesquisas.

No Cerrado brasileiro, a produtividade pode superar $3,0 \text{ t ha}^{-1}$, chegando a $5,0 \text{ t ha}^{-1}$ em condições irrigadas no Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, em Montes Claros. Em altitudes superiores a 800 metros, o rendimento é ainda maior, com garantias mínimas de $2,5$ a $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ quando se utilizam cultivares tolerantes a fungos de solo e ao déficit hídrico (Artiaga et al., 2015).

No entanto, a produção nacional é insuficiente para atender a demanda interna, tornando o Brasil dependente de importações (Avelar, 2016; FAOSTAT, 2025). Em 2021, foram importadas cerca de 11,3 mil toneladas de México, Argentina e Índia (Ribeiro et al., 2021).

Com o apoio da pesquisa, a área cultivada passou de 26 hectares em 2013 para 10.000 hectares em 2018, tendência que continua a crescer. Contudo, ainda existem limitações relacionadas à produção e disponibilidade de sementes básicas e certificadas para plantio comercial. Estados como Distrito Federal, Goiás, Bahia, Mato Grosso e Minas Gerais têm buscado superar essa dependência de importações, promovendo cultivares adaptadas ao clima brasileiro, como as variedades BRS Aleppo e BRS Toro.

Caracterização Botânica

O grão-de-bico pertence à família Fabaceae, subfamília Papilionoideae, tribo Cicereae e gênero Cicer. O gênero apresenta mais de 100 espécies descritas, sendo nove anuais e 35 perenes, com centro de diversidade no sudoeste da Ásia, incluindo espécies endêmicas em Marrocos e nas Ilhas Canárias. Fenotipicamente, divide-se em dois grupos: microsperma (Desi) e macrosperma (Kabuli) (Queiroga et al., 2021). É uma planta diploide com, geralmente, 16 cromossomos; algumas raças locais têm 14 e, caracteristicamente, suas flores hermafroditas realizam polinização antes da abertura (cleistogamia), permitindo autogamia com mais de 95% de autopolinização natural.

Trata-se de planta herbácea anual, ereta ou rasteira, com altura entre 30 a 70 cm, e ramificações na base do caule, próximas ao solo. As flores são isoladas em racemos axilares, podendo ocorrer duplas devido a mutações. A planta apresenta ramificações primárias, secundárias e terciárias, é resistente ao acamamento e suas vagens contêm uma ou duas sementes. Cotilédones e nódulos da plântula permanecem abaixo do solo durante a germinação, conferindo tolerância ao frio e capacidade de regeneração. A raiz primária é longa e rapidamente ramificada, com a primeira folha verdadeira emergindo no terceiro nó (Nascimento et al., 2016).

Quatro hábitos de crescimento são observados: ereto, semi-ereto, semi-prostrado e prostrado. Tipos eretos e semi-eretos são indicados para colheita mecanizada, enquanto os semi-prostrados e prostrados adaptam-se melhor a áreas secas. A planta apresenta crescimento indeterminado, com florescimento contínuo. São, comercialmente reconhecidas, duas classes: Desi (sementes pequenas, ásperas, flores púrpuras) e Kabuli (sementes maiores, lisas, flores brancas) (Nascimento et al., 2016).

As hastes apresentam coloração verde ou verde com manchas púrpuras, sendo possíveis formas de identificar Kabuli (verde) e Desi (verde com manchas púrpuras). O grupo Desi tem folhas tipo samambaia; o Kabuli, folhas compostas e unifoliadas. O sistema radicular é extenso em ambos, permitindo captação de água nas camadas profundas do solo, conferindo tolerância relativa à seca. As raízes laterais formam associação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio – Rhizóbios (Avelar et al., 2018).

A amplitude térmica ideal para a espécie é de 18 a 24,5°C, com variações diurnas entre 21 e 29 °C e noturnas entre 15 e 20 °C (Chauhan et al., 2017). A planta prefere dias longos e floresce mais rápido com aumento de temperatura. Baixos níveis de luz, competição por nutrientes, fatores hormonais e falha na fertilização podem causar má formação das vagens e grãos (Knights; Hobson, 2016).

O grão-de-bico é predominantemente autopolinizador, embora a polinização cruzada por insetos possa ocorrer (Latif et al., 2019). As vagens são ovais e inflam rapidamente após a polinização. As partes aéreas, exceto as flores, são cobertas por tricomas que secretam ácidos orgânicos para proteção contra pragas. As raízes podem atingir entre 45 a 60 cm de profundidade, podendo chegar a 105 cm sob estresse hídrico, especialmente, quando colonizadas por *Mesorhizobium ciceri* (Ramamoorthy et al., 2017).

Efeitos do Déficit Hídrico nos Aspectos Morfofisiológicos

A água é fundamental para processos bioquímicos celulares e funções fisiológicas essenciais ao desenvolvimento vegetal, correspondendo a cerca de 90% da biomassa verde (Oliveira, 2022). A escassez hídrica compromete a produtividade agrícola ao afetar crescimento, eficiência fisiológica e provocar estresse nas plantas, limitando processos como fotossíntese, abertura estomática, transporte de nutrientes e trocas gasosas (Plantier, 2019).

Define-se déficit hídrico como a condição em que o conteúdo de água da planta está abaixo do máximo possível em estado hidratado (Taiz et al., 2017). O fechamento dos estômatos é uma das primeiras respostas fisiológicas adaptativas a esta condição, reduzindo a absorção de CO₂ e a taxa fotossintética, o que pode levar à produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) e danos celulares (Melo, 2021). Ainda assim, essa resposta protege a planta ao regular a perda de água, promover ajuste osmótico e controlar o crescimento (Shen et al., 2021; Haworth et al., 2021).

Sob estresse hídrico, as plantas apresentam redução da área foliar, do número e tamanho das folhas, expansão radicular, redistribuição de biomassa, senescência precoce e diminuição da atividade fotossintética (Abreu et al., 2022). Avaliar o sistema radicular é crucial, pois raízes

profundas ampliam a capacidade de extração de água, aumentando a tolerância à seca (Gray; Brady, 2016). Entretanto, o cultivo em vasos pode limitar esse crescimento natural, alterando as respostas das plantas.

Entender os mecanismos de tolerância ao estresse hídrico e sua variação entre genótipos é essencial para estratégias de manejo e melhoramento genético, visando o uso eficiente da água e a sobrevivência das culturas. O déficit hídrico é considerado moderado quando consome mais de 30% da água disponível e grave quando ultrapassa 70% (Melo, 2021). O manejo eficiente da irrigação deve considerar a disponibilidade hídrica e as necessidades específicas de cada cultura, especialmente em períodos de seca, em que há competição pelo uso da água entre agricultura e outras atividades (Libardi et al., 2019; Justino et al., 2019).

A escassez hídrica é uma das principais limitações à produtividade agrícola, afetando diretamente o desenvolvimento vegetal, já que 80% a 95% da biomassa fresca das plantas é composta por água (Seleiman et al., 2021; Zareen et al., 2024). A seca é um fenômeno meteorológico caracterizado por longos períodos de baixa precipitação ou má distribuição das chuvas, sendo o principal fator abiótico limitante ao crescimento, desenvolvimento e produtividade de culturas. Além disso, eventos climáticos extremos, cada vez mais frequentes, impactam significativamente a produção, principalmente nos estádios fenológicos mais sensíveis, como floração e enchimento de grãos (Salehilisar, 2016; Silva et al., 2022; Rasa et al., 2018).

O déficit hídrico reduz o conteúdo de água celular, restringe a abertura estomática e diminui a assimilação de CO_2 , além de causar danos oxidativos a membranas e proteínas, afetando a integridade dos cloroplastos e a fotossíntese. Conseqüentemente, há redução dos pigmentos fotossintéticos, desorganização dos tilacóides e inibição das enzimas do ciclo de Calvin, prejudicando o crescimento e a produção (Wang et al., 2022).

A fotossíntese é um dos processos mais afetados pelo déficit hídrico, pois o fechamento estomático limita a difusão de CO_2 , reduzindo a assimilação fotossintética. Embora essa resposta conserve a água, ela eleva a temperatura foliar e estimula a produção de espécies reativas de oxigênio, (ROS) prejudicando a atividade bioquímica do ciclo de Calvin (Zargar et al., 2017).

Respostas ao déficit hídrico em plantas de grão-de-bico

As plantas de grão-de-bico, classificadas como de metabolismo C_3 , adotam três estratégias principais para responder ao déficit hídrico: evasão, escape e tolerância (Gupta et al., 2020). A evasão consiste em manter o teor de água nos tecidos, geralmente, por meio do

fechamento estomático e redução da transpiração, para minimizar a perda hídrica. A estratégia de escape envolve acelerar o ciclo de vida da planta, permitindo que complete seu desenvolvimento antes que o estresse hídrico se torne severo. Já a tolerância permite que a planta sobreviva sob condições de baixo teor hídrico, apesar do alto custo energético para manter funções fisiológicas básicas (Basu et al., 2016; Santos et al., 2022).

Para enfrentar o déficit hídrico, o grão-de-bico ativa mecanismos complexos que incluem a redução da área foliar e restrição do crescimento para diminuir a demanda por água. O ajuste osmótico ocorre pela acumulação de solutos compatíveis, ajudando a manter o equilíbrio celular mesmo sob estresse. A planta também aumenta a produção de enzimas antioxidantes, que protegem contra danos causados por espécies reativas de oxigênio geradas em condições adversas. Além disso, o grão-de-bico promove maior desenvolvimento radicular com raízes mais profundas e extensas, buscando água em camadas inferiores do solo para sustentar o metabolismo e o crescimento (Zia et al., 2021; Shah et al., 2019).

Essas respostas adaptativas colaboram para que o grão-de-bico tolere períodos de seca, mantendo produtividade e viabilidade em ambientes semiáridos, como o Norte de Minas Gerais. Essa capacidade de adaptação torna essencial o desenvolvimento de cultivares específicas com maior eficiência no uso da água e maior resistência ao déficit hídrico, integrando a genética com o manejo agrônomico adequado. Conforme esquematizado na Figura 1.

Figura1 – Estratégias principais: evasão, escape e tolerância adotada pelas plantas sob condições de déficit hídrico



O déficit hídrico provoca respostas variadas entre espécies e variedades de grão-de-bico, refletindo diferentes níveis de tolerância (Zareen et al., 2024). Morfológicamente, esse estresse induz folhas menores, enrolamento foliar, alterações na posição e coloração das folhas, e pode prejudicar o crescimento celular, que é altamente sensível à limitação hídrica (Seleiman et al., 2024). Bioquimicamente, ocorre diminuição da eficiência fotoquímica, acumulação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e aumento de solutos osmoprotetores, como prolina e açúcares, que atuam na proteção celular (Santos et al., 2022; Sato et al., 2024).

Fisiologicamente, a planta responde com fechamento estomático, redução da fotossíntese e da transpiração, alterações na parede celular e aumento da temperatura foliar, manifestações integradas em todos os níveis, do celular ao organismo (Condon, 2020; Leakey et al., 2019; Tardieu et al., 2018). No grão-de-bico, a identificação desses sinais é crucial para garantir produtividade, principalmente em regiões sujeitas à seca, onde avanços no melhoramento genético são urgentes devido às mudanças climáticas (Mareri et al., 2022). O estresse varia em intensidade, causando desde alterações fisiológicas em níveis moderados até risco de morte em níveis severos (Santos et al., 2022).

O déficit hídrico afeta negativamente germinação, crescimento radicular e formação de sementes, agravado pelo aumento dos EROs e pelo aumento do etileno, que acelera a senescência (Fioreze; Guimarães, 2015; Anjum et al., 2011). Citocininas ajudam a preservar a fotossíntese, e variedades do tipo Desi apresentam maior tolerância à seca que as do tipo Kabuli, devido a níveis superiores de antioxidantes, melhor germinação, metabolismo de açúcares e proteção contra danos oxidativos (Farooq et al., 2018). Hormônios, como giberelinas e brassinosteroides, favorecem o crescimento e a adaptação ao estresse (Taiz et al., 2017).

Sob estresse hídrico, o ciclo da cultura se encurta, com maturação precoce (Pang et al., 2016), e cada cultivar responde de forma distinta, influenciando características morfológicas como formato das folhas e hábito de crescimento, o que impacta o consumo de água e a produtividade. Em condições favoráveis, o ciclo natural propicia florescimento e formação contínua de vagens.

Conhecer a demanda hídrica das cultivares é essencial para otimizar a produção, especialmente diante das variações morfológicas e fisiológicas entre elas. A relação entre teor de água no solo e disponibilidade de nutrientes afeta diretamente a qualidade e produtividade dos grãos, especialmente o teor protéico (Wijewardana et al., 2019), com umidade adequada favorecendo acumulação de proteína, amido e gordura (Kaplan et al., 2019; Mohammed et al., 2017). Irrigação suplementar e plantio antecipado são práticas que evitam déficit hídrico,

elevando a produtividade (Seidel et al., 2019). No Norte de Minas Gerais, o plantio é realizado em maio.

Aproveitando a umidade residual do solo para evitar déficit hídrico progressivo que pode ser severo na fase de maturação (Ramamoorthy et al., 2017). Assim, é fundamental compreender o balanço hídrico e as respostas adaptativas do grão-de-bico para garantir altos rendimentos.

Água no solo

A disponibilidade de água no solo é um fator crítico para o crescimento e desenvolvimento do grão-de-bico, pois a água sustenta processos fisiológicos essenciais para a planta. Embora cerca de 95% da água absorvida pelas raízes seja perdida por transpiração, o restante é fundamental para reações bioquímicas e transporte de solutos vitais (Taiz et al., 2017). A textura e composição do solo influenciam diretamente a capacidade de retenção de água, sendo que solos argilosos, devido a seus poros menores, retêm mais água em comparação aos solos arenosos, podendo assim mitigar melhor períodos de estiagem (Nunes et al., 2019; Basu et al., 2016). No entanto, à medida que a umidade do solo diminui, a água retida fica menos disponível, dificultando a absorção pelas raízes, especialmente, se estas não alcançarem camadas mais profundas (Carlesso, 1995).

O ponto de murcha permanente (PMP), definido tradicionalmente em cerca de -1,5 MPa, representa o limite em que as plantas não conseguem mais recuperar seu turgor, levando ao murchamento irreversível das folhas. Esse valor pode variar conforme a espécie, estágio de desenvolvimento, tipo de solo e condições ambientais (Procópio et al., 2004; Klein et al., 2010).

Em condições de esgotamento hídrico do solo, o grão-de-bico e outras plantas aceleram seu ciclo de vida, priorizando a reprodução e disseminação das sementes. Durante esse processo, mecanismos de percepção do estresse ocorrem na interface raiz-solo, desencadeando respostas fisiológicas importantes. Um exemplo-chave é a sinalização química mediada pelo fitormônio ácido abscísico (ABA), que comunica o estado hídrico da raiz à parte aérea, promovendo o fechamento estomático para reduzir a perda de água (Taiz et al., 2017).

Portanto, o manejo eficiente da disponibilidade de água, aliado ao entendimento dos processos fisiológicos envolvidos, é essencial para otimizar a produtividade do grão-de-bico, especialmente, em regiões semiáridas como o Norte de Minas Gerais. Estratégias, como monitoramento contínuo da umidade do solo e manejo adequado da irrigação, podem ajudar a prevenir o estresse hídrico severo, protegendo o ciclo produtivo da planta.

Estresse por déficit hídrico e potencial hídrico das plantas de grão-de-bico

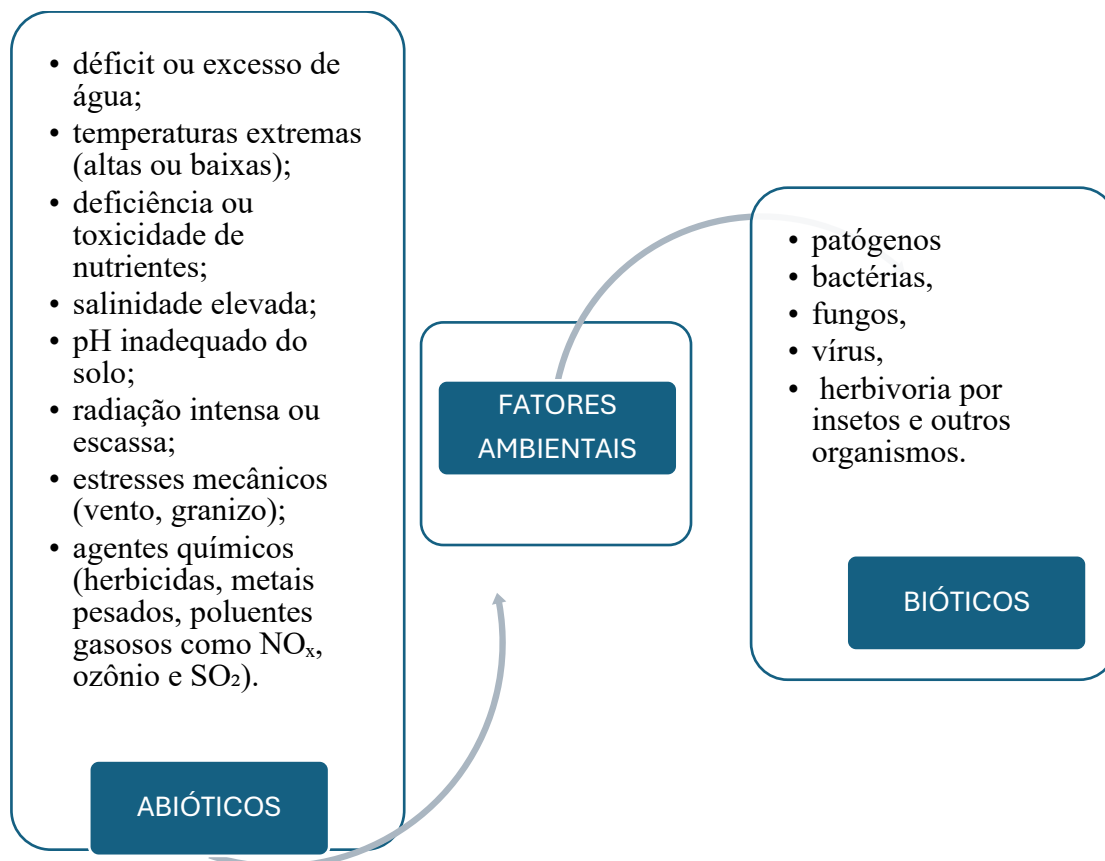
O estresse por déficit hídrico em plantas de grão-de-bico pode ser compreendido sob a ótica do potencial hídrico, que influencia diretamente o desenvolvimento vegetal. O conceito físico de estresse aplicado a plantas refere-se à resposta a forças externas que comprometem o crescimento e a produtividade, podendo se tornar permanente se a intensidade se agravar (Schulze et al., 2005). No contexto fisiológico, o estresse refere-se a qualquer fator externo — biótico ou abiótico — que prejudique o pleno desenvolvimento da planta (Daneluzzi, 2024), conforme apresentado na Figura 3.

Em plantas de grão-de-bico, o déficit hídrico afeta o potencial hídrico nas células, levando a respostas como redução na expansão celular, fechamento estomático e aceleração do ciclo de vida para minimizar o impacto do estresse (Taiz et al., 2017). Pesquisas indicam que genótipos de grão-de-bico possuem capacidades variadas de resistência ao estresse hídrico, decorrentes de diferenças genéticas que influenciam os mecanismos fisiológicos, morfológicos e bioquímicos de adaptação, incluindo maior eficiência no uso da água, tolerância à desidratação e manutenção das funções fotossintéticas sob condições adversas (Moreira, 2020; Gupta et al., 2020).

Além disso, o manejo hídrico eficiente, considerando a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo específicos para a região, é essencial para garantir uma produção sustentável e estável, especialmente em ambientes semiáridos, como o Cerrado no Norte de Minas Gerais. Estratégias físicas, como a otimização da irrigação, e genéticas, como o melhoramento de cultivares tolerantes, são complementares para mitigar perdas causadas pelo déficit hídrico.

Portanto, entender o potencial hídrico e as respostas fisiológicas ao déficit hídrico permite desenvolver cultivares de grão-de-bico com melhor adaptação às condições de estresse, garantindo maior resiliência e produtividade. O aprimoramento dessas estratégias é vital para a sustentabilidade da cultura em zonas áridas e semiáridas, com impacto direto na segurança alimentar regional.

Figura 3 – Fatores, ambientais, bióticos e abióticos que prejudicam desenvolvimento de plantas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O déficit hídrico afeta negativamente a eficiência das reações de assimilação nas plantas de grão-de-bico, reduzindo a fotossíntese e, conseqüentemente, a produção vegetal. Durante eventos de déficit hídrico, há uma redução no potencial hídrico do solo, que provoca diminuição no potencial hídrico da planta, impactando vários processos fisiológicos essenciais ao desenvolvimento e equilíbrio hidroestático ao longo do continuum solo-planta-atmosfera (Taiz et al., 2017).

A resposta das plantas ao déficit ilustrado na Figura 6 envolve diversas modificações, como o fechamento estomático para reduzir a perda de água, a diminuição da assimilação de CO₂ e a redução da taxa fotossintética, levando a uma menor produção de energia e açúcares necessários para o crescimento. Além disso, o estresse hídrico causa redução da biomassa, amarelecimento e queda prematura das folhas e pode comprometer o crescimento radicular, o que limita ainda mais a capacidade da planta de captar água e nutrientes.

Paralelamente, respostas bioquímicas, como o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e ativação das defesas antioxidantes, são ativadas para mitigar os efeitos do estresse oxidativo e proteger as estruturas celulares (Santos et al., 2022). O potencial hídrico reduzido ainda influencia a integridade dos pigmentos fotossintéticos e o funcionamento do fotossistema II, refletindo em menor eficiência fotossintética e comprometendo a produtividade final do grão-de-bico.

Portanto, compreender a dinâmica da disponibilidade hídrica no solo e sua relação com o potencial hídrico das plantas é fundamental para implementar estratégias de manejo adequadas que minimizem o impacto do déficit e garantam a produtividade do grão-de-bico, especialmente, em regiões semiáridas. O manejo eficiente da irrigação e o uso de cultivares mais tolerantes ao estresse hídrico são medidas essenciais para a sustentabilidade da cultura.

Figura 6 – Diagrama de resposta das plantas ao déficit hídrico

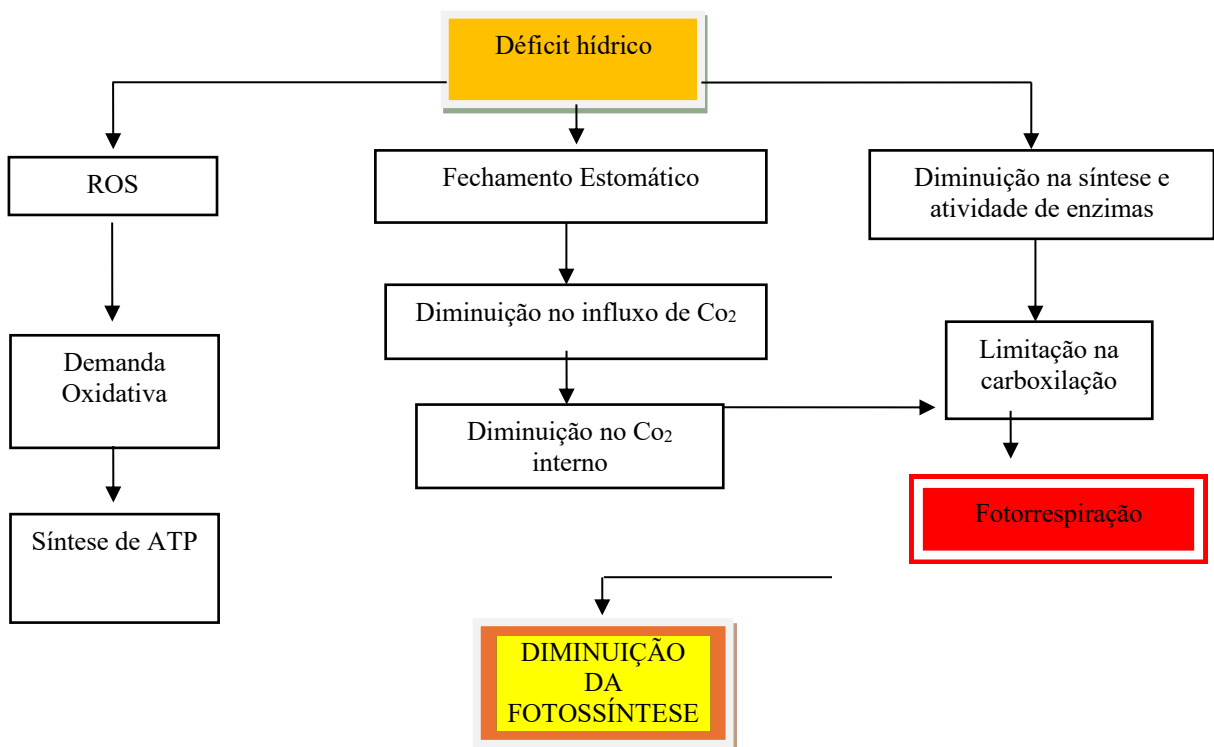


Figura 6. A fotossíntese é afetada principalmente pelo déficit hídrico. Inicialmente, ocorre fechamento estomático, diminuindo a perda de água via transpiração, o que reduz o influxo de CO₂ e afeta diretamente a carboxilação, promovendo a fotorrespiração. Além disso, o déficit hídrico interfere na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e na defesa antioxidante, resultando em acúmulo de ROS, que impacta a demanda oxidativa, causa danos celulares, afeta a síntese de ATP e, conseqüentemente, a fotossíntese.

A fotossíntese é um processo bioquímico no qual esqueletos carbônicos são produzidos, utilizando dióxido de carbono (CO₂) e água, além da energia proveniente da radiação solar. Essa assimilação ocorre nos cloroplastos, organelas compostas por um conjunto de membranas

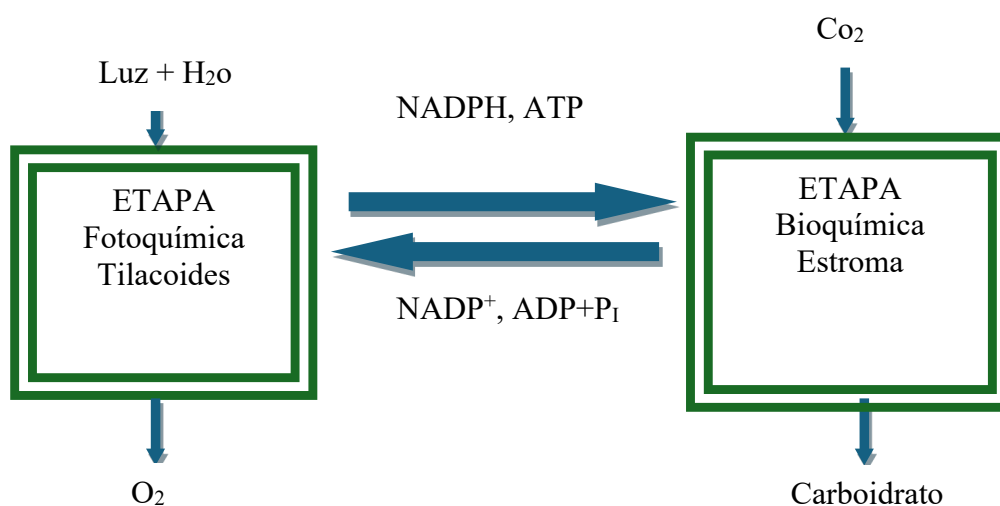
e complexos pigmentos-proteicos especializados em realizar a fotossíntese, que é classicamente dividida em duas etapas principais: a etapa fotoquímica e a etapa bioquímica (Fig 7).

Na etapa fotoquímica, a energia solar é capturada pelos pigmentos clorofílicos, especialmente a clorofila, promovendo a excitação de elétrons e a geração de energia química na forma de ATP e NADPH. Essa energia é então utilizada na etapa bioquímica, também conhecida como ciclo de Calvin, para fixar o CO_2 em moléculas orgânicas que servirão de base para a síntese de açúcares e outros compostos essenciais ao metabolismo da planta.

Em plantas de grão-de-bico, cuja eficiência fotossintética é diretamente afetada pelo déficit hídrico, a limitação da disponibilidade de água interfere principalmente no fechamento estomático, reduzindo a entrada de CO_2 e prejudicando a capacidade de produção de fotoassimilados. Além disso, o estresse hídrico pode causar danos aos pigmentos fotossintéticos e a estrutura dos cloroplastos, comprometendo o funcionamento do fotossistema II e a atividade das enzimas do ciclo de Calvin (Taiz et al., 2017; Santos et al., 2022).

Assim, a fotossíntese é o principal processo impactado pelo déficit hídrico, influenciando negativamente o crescimento e produtividade do grão-de-bico, reforçando a importância do manejo hídrico eficiente para garantir condições ótimas de desenvolvimento da cultura.

Figura 7 – Representação das duas etapas que compõem a fotossíntese



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 7. Representação das duas etapas que compõem a fotossíntese, sua interconexão e alocação em um cloroplasto. A etapa fotoquímica, na qual ocorrem as reações luminosas, ocorrem nos tilacoides com a absorção de energia luminosa e produção de oxigênio (O_2), NADPH e ATP. Já a etapa bioquímica, que acontece no estroma, realiza a fixação do dióxido de carbono (CO_2), originando carboidratos, NADP^+ e $\text{ADP} + \text{P}_i$. As moléculas de NADP^+ e ADP podem ser novamente reduzidas na etapa fotoquímica, mantendo o ciclo entre as duas fases.

Movimentação da Água nas Plantas

A água é vital para o crescimento, desenvolvimento e sobrevivência das plantas, incluindo o grão-de-bico. A absorção da água ocorre pelas raízes, e seu transporte até os tecidos aéreos se dá via xilema. Desequilíbrios entre absorção, condução e perda de água para a atmosfera podem causar déficit hídrico, comprometendo processos metabólicos essenciais (Medici, 2023).

As paredes celulares das plantas desempenham papel fundamental nas relações hídricas, promovendo a pressão de turgor, força hidrostática indispensável para a expansão celular, abertura estomática, transporte no floema e movimentações celulares. As membranas celulares são seletivamente permeáveis, e a difusão da água é facilitada por proteínas integrais chamadas aquaporinas, que formam canais específicos para o transporte hídrico (Medici, 2023).

O movimento da água nas plantas é conduzido por gradientes de potencial hídrico (Ψ_w), que expressam a energia livre da água em um sistema definido. A água migrará de regiões com maior Ψ_w para regiões com menor Ψ_w (Daneluzzi, 2024). O potencial hídrico é constituído por três componentes principais: o potencial osmótico Ψ_s (relacionado à concentração de solutos), sempre negativo ou nulo; o potencial de pressão Ψ_p (positivo em pressão de turgor ou negativo em tensão no xilema); e o potencial gravitacional Ψ_g , geralmente desprezível em escala celular. Em células vegetais, o Ψ_w é tipicamente menor ou igual a 0 MPa, indicando energia livre reduzida em relação à água pura.

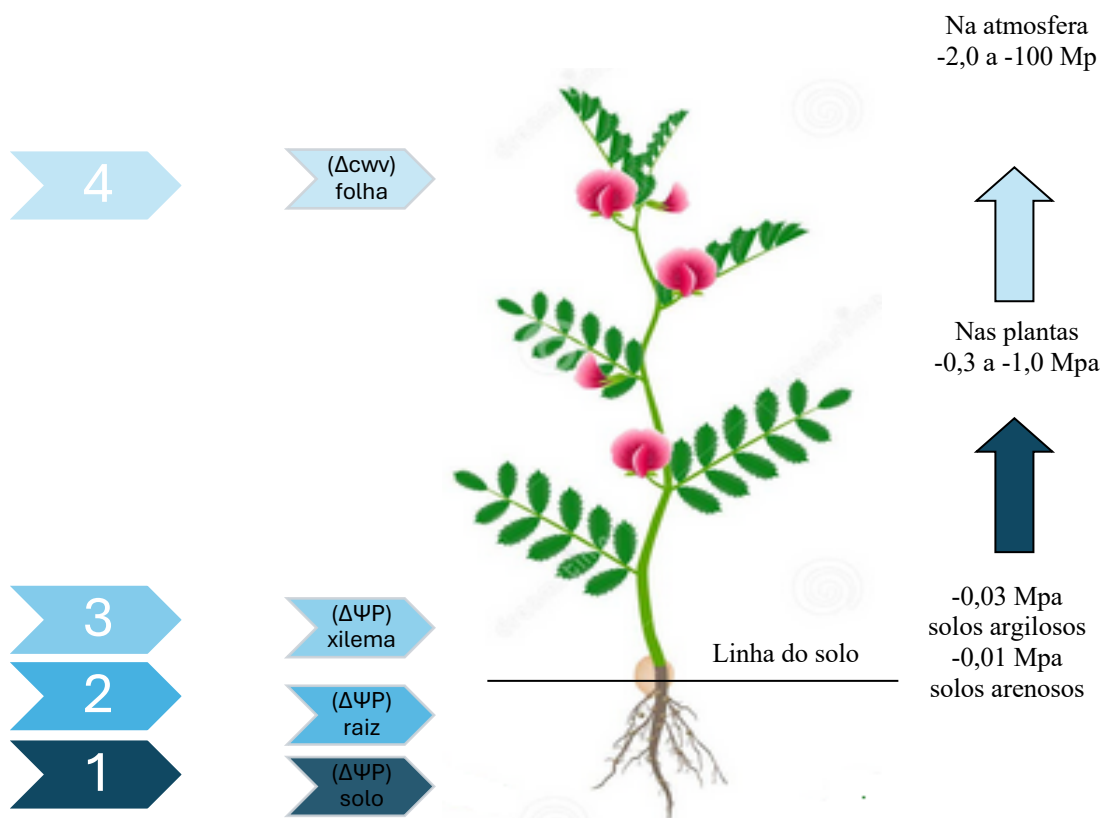
O continuum solo-planta-atmosfera descreve o percurso da água, desde sua absorção na solução do solo pelas raízes, passando pela translocação até as folhas, e perda para a atmosfera por transpiração, obedecendo a uma ordem decrescente de valores de potencial hídrico, conforme ilustrado (Fig 8). As aquaporinas, presentes nas membranas celulares, são os canais que facilitam esse trânsito de água, desempenhando papel crucial na manutenção da pressão de turgor, expansão celular, e regulação da abertura estomática, influenciando diretamente a eficiência do transporte hídrico entre solo, planta e atmosfera.

A regulação das aquaporinas permite que a planta adapte seu fluxo de água conforme condições ambientais, fechando os canais durante o déficit hídrico para reduzir a perda de água, ou abrindo-os em condições favoráveis para otimizar a absorção e distribuição hídrica. Essa eficiência é essencial para o grão-de-bico, especialmente em regiões semiáridas, onde a disponibilidade de água é limitada e o manejo hídrico deve ser otimizado para manter a produtividade.

Compreender esses mecanismos fisiológicos, bioquímicos e físicos do transporte e regulação hídrica na planta é fundamental para desenvolver práticas de manejo eficiente da

irrigação e para o melhoramento genético de cultivares de grão-de-bico mais adaptadas ao déficit hídrico, mantendo a sustentabilidade da cultura e reduzindo riscos de perdas produtivas em ambientes adversos.

Figura 8 – Principais forças propulsoras do fluxo de água do solo



Fonte: Adaptado de Taiz et al. (2017).

Figura 8. Principais forças propulsoras do fluxo de água do solo, através da planta, até a atmosfera. Diferenças na concentração de vapor de água (ΔC_{wv}) entre a folha e o ar promovem a difusão do vapor da folha para a atmosfera. As diferenças no potencial de pressão ($\Delta \Psi P$) conduzem o fluxo em massa de água pelos vasos xilemáticos, enquanto as diferenças no potencial hídrico ($\Delta \Psi H$) direcionam o movimento da água através das células vivas na raiz. Fonte: Adaptado de Taiz et al. (2017).

Os valores de potencial hídrico no sistema solo-planta-atmosfera apresentam uma padronização clara. Nos solos, os potenciais hídricos são os maiores, variando entre -0,03 MPa em solos argilosos e -0,01 MPa em solos arenosos, devido à maior retenção de água nos solos argilosos causada pelos menores poros que aumentam as forças capilares. Nas plantas, o potencial hídrico é intermediário, menor do que no solo, porém maior do que na atmosfera, variando de -0,3 a -1,0 MPa, refletindo os sistemas fisiológicos que regulam a pressão de turgor e o transporte de água dentro dos tecidos (fig 8). Na atmosfera, os valores são os mais baixos, variando de aproximadamente -2,0 a -100 MPa, devido à alta demanda evaporativa e baixa umidade relativa do ar.

Esse gradiente de potencial é o que movimenta a água, que flui naturalmente do solo (alto potencial) para a planta (potencial intermediário) e da planta para a atmosfera (baixo potencial), estabelecendo o fluxo contínuo essencial para a transpiração, o transporte de nutrientes e a manutenção do metabolismo vegetal. A eficiência desse fluxo depende da capacidade do sistema solo-planta-atmosfera em manter esse gradiente, especialmente em ambientes semiáridos onde o déficit hídrico é comum.

A compreensão desses valores é fundamental para o manejo hídrico adequado da cultura do grão-de-bico, pois auxilia na avaliação da disponibilidade real de água para a planta e no planejamento da irrigação, evitando tanto o estresse por falta de água quanto o desperdício por excesso, promovendo produtividade e sustentabilidade do cultivo.

Do Solo às Células

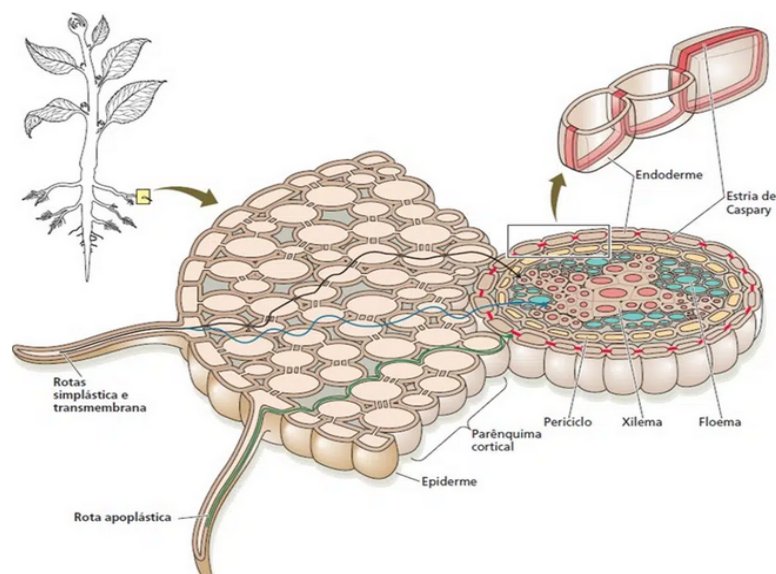
A disponibilidade e o movimento da água no solo dependem diretamente da sua textura e estrutura, as quais influenciam o potencial hídrico do solo e a capacidade de absorção radicular (Daneluzzi, 2024). A absorção ocorre por meio dos pelos radiculares, extensões epidérmicas que aumentam a superfície de contato das raízes com o solo. A água pode se deslocar por três rotas principais até o cilindro central da raiz: via apoplasto (extracelular, através das paredes celulares e espaços intercelulares), via simplasto (intracelular, pelo citoplasma conectado por plasmodesmos) e via transmembranar (atravessando sucessivamente as membranas plasmáticas), Figura 9.

O sistema vascular conduz a água e nutrientes, com o xilema transportando água e sais minerais das raízes para os órgãos aéreos, e o floema distribuindo compostos orgânicos das fontes de síntese para os locais de armazenamento ou consumo metabólico. Essa dinâmica é fundamental para o funcionamento do continuum solo-planta-atmosfera e para a manutenção do potencial hídrico adequado para a planta.

O potencial hídrico do solo, associado ao seu potencial osmótico e gravitacional, afeta, diretamente, a absorção radicular, que depende da espessura, profundidade e extensão dos pelos radiculares, assim como da textura do solo. Solos arenosos retêm menos água disponível que solos argilosos, impactando a eficiência da absorção. Além disso, fatores como salinidade também influenciam o potencial osmótico, reduzindo a disponibilidade hídrica para as plantas.

A compreensão desses mecanismos é crucial para o manejo das culturas de grão-de-bico, principalmente, em regiões semiáridas, onde a eficiência na absorção de água e nutrientes pode ser determinante para garantir a produtividade e minimizar os efeitos do déficit hídrico.

Figura 9 – Rotas de absorção de água pelas raízes: simplástica, apoplástica e transmembrana



Fonte: Taiz et al., 2017.

O transporte de água nas plantas, como no grão-de-bico, ocorre de forma passiva, impulsionado por gradientes de potencial hídrico, sem gasto energético pela planta (Daneluzzi, 2024). A água move-se das raízes, região de maior potencial hídrico, para as folhas, onde o potencial é menor, sendo esse fluxo sustentado principalmente pela transpiração foliar que cria uma força de sucção capaz de vencer a gravidade e garantir a condução contínua e eficiente da água pelo xilema.

O xilema, por sua estrutura especializada com elementos de vaso e traqueídes, permite este transporte ascendente. Elementos de vaso são curtos e largos, com placas perfuradas que facilitam o fluxo de água, enquanto traqueídes são mais estreitos e resistentes à cavitação (formação de bolhas de ar). A coesão e adesão das moléculas de água, junto à pressão gerada nas raízes e à força da transpiração, são fundamentais para o movimento da água.

A transpiração cria um gradiente de potencial hídrico entre as folhas e a atmosfera, reduzindo o potencial hídrico nas folhas e estabelecendo o fluxo da água do solo para as raízes, e destas para as folhas e atmosfera. Esse mecanismo permite o transporte eficiente dos nutrientes dissolvidos na água e mantém a pressão de turgor, essencial para a expansão celular, abertura estomática e processos metabólicos vitais.

Este processo integrado no sistema solo-planta-atmosfera é especialmente importante no manejo do grão-de-bico, que cresce em ambientes semiáridos onde a disponibilidade hídrica

é limitada. Entender esse fluxo e seus determinantes permite otimizar a irrigação, minimizando perdas e melhorando a produtividade na cultura.

Evapotranspiração e coeficiente da cultura K_c

O método FAO-56, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), é, atualmente, a referência internacional para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), fundamental para o planejamento hídrico agrícola (Allen et al., 1998). Este método, baseado na equação de Penman-Monteith, representa uma modelagem rigorosa dos processos físicos e fisiológicos que governam a evapotranspiração, combinando variáveis meteorológicas como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento para calcular a ET_o com elevada precisão.

Para obter a evapotranspiração específica da cultura (ET_c), multiplica-se a ET_o pelo coeficiente de cultura (K_c), o qual reflete as características canopy da planta e suas exigências hídricas nas diferentes fases fenológicas, devendo ser determinado experimentalmente e ajustado regionalmente (Anapalli et al., 2019). A utilização do método FAO-56 possibilita a avaliação do balanço hídrico dos sistemas agrícolas, permitindo estimar déficits ou excessos de água, o que é essencial para o manejo eficiente da irrigação e para garantir a sustentabilidade da produção.

Além de sua aplicação na agricultura, a evapotranspiração desempenha papel crucial no ciclo hidrológico global, sendo responsável pela transferência significativa de água da superfície terrestre para a atmosfera. Estudos apontam que, aproximadamente, 70% da precipitação retorna à atmosfera por evapotranspiração, enfatizando sua importância na gestão dos recursos hídricos (Brutsaert, 2005; Castiglio, 2021).

A sensibilidade da evapotranspiração a fatores climáticos locais, como variações de temperatura, radiação solar, umidade relativa e vento, exige monitoramento contínuo e ajuste das práticas de manejo, especialmente em regiões semiáridas onde a agricultura é mais vulnerável ao déficit hídrico. O método FAO-56, portanto, constitui uma ferramenta imprescindível para pesquisadores e gestores agrícolas que buscam otimizar o uso da água e manter a produtividade em culturas como o grão-de-bico.

Evapotranspiração de Referência (ET_o)

A evapotranspiração de referência (ET_o) é um conceito fundamental no estudo da dinâmica hídrica dos sistemas agrícolas e hidrológicos, e é medida por meio de técnicas e princípios físicos que refletem a complexidade do processo de transferência de água do solo-

planta para a atmosfera (Allen et al., 2011). Originalmente, a ETo foi desenvolvida por pesquisadores e engenheiros da irrigação com o intuito de superar ambiguidades associadas à definição de evapotranspiração potencial, oferecendo um padrão mais robusto e aplicável em diversos contextos (Frizzone, 2004).

A ETo é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética de referência, caracterizada por uma vegetação rasteira com aproximadamente 0,12 metros de altura e albedo de 0,23. Esta cultura representa uma superfície homogênea, com cobertura total do solo, crescimento ativo, disponibilidade hídrica adequada e livre de estresse causado por fatores bióticos ou abióticos (Smith, 1991). Assim, a ETo traduz a demanda atmosférica por evapotranspiração de forma independente das condições específicas da cultura e do solo.

O método mais consagrado para o cálculo da ETo é o método Penman-Monteith, adotado pela FAO como padrão internacional (Allen et al., 1998), por integrar variáveis meteorológicas essenciais tais como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A estimativa precisa da ETo permite a avaliação da necessidade hídrica das culturas e o planejamento eficiente da irrigação.

Embora a literatura apresente mais de 50 modelos distintos para estimar a ETo, a diversidade de resultados é reflexo da complexidade dos processos envolvidos e das variações climáticas regionais. Adicionalmente, desafios na calibração dos coeficientes e a limitação dos sensores meteorológicos contribuem para a variabilidade e a precisão dos modelos (Chaves, 2015; França et al., 2021).

Portanto, a ETo constitui-se como um parâmetro agrometeorológico crucial para o manejo sustentável dos recursos hídricos na agricultura, especialmente em regiões semiáridas. O emprego de métodos padronizados e sua adaptação às condições locais são essenciais para garantir a produtividade e a eficiência no uso da água, aspectos imprescindíveis ao cultivo do grão-de-bico.

Método de Penman-Monteith (FAO)

O método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO no Boletim 56 (1998), é reconhecido como o padrão internacional para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), tendo sido adotado após a conferência da FAO em Roma na década de 1990 (Allen et al., 1998). A robustez do modelo advém de seu embasamento físico, articulando a interação entre perdas de água, parâmetros fisiológicos das culturas e propriedades aerodinâmicas do dossel vegetal, o que o torna adaptável a diferentes condições climáticas e geográficas (Landeras et al., 2008).

A equação integra variáveis meteorológicas como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, exigindo medições meteorológicas precisas e confiáveis, que representam o principal desafio na sua aplicação prática (Gomide, 2021). A primazia do método Penman-Monteith (PM) é justificada pela sua habilidade superior de estimar a evapotranspiração de uma cultura de referência constituída por vegetação rasteira, livre de estresse hídrico e doenças, provendo uma referência padronizada que supera outros modelos existentes na literatura (Cai et al., 2007; Gavilan et al., 2007; Xing et al., 2008).

A incorporação explícita de processos fisiológicos e aerodinâmicos, aliados a uma base físico-matemática consolidada, garante seu desempenho aprimorado na estimativa das demandas hídricas das culturas, o que é fundamental para o planejamento agrícola e manejo eficiente dos recursos hídricos, sobretudo em regiões sujeitas a restrições de água, como o semiárido brasileiro.

Evapotranspiração da Cultura (ETc)

A evapotranspiração da cultura (ETc) representa o volume total de água transferido do solo para a atmosfera através da transpiração e da evaporação oriunda de uma cultura específica cultivada em condições ideais de solo e clima, livre de estresses bióticos e abióticos (Doorenbos; Kassam, 1979). O cálculo da ETc baseia-se na multiplicação da ETo pelo coeficiente de cultura (Kc), este último ajustado conforme as fases fenológicas da planta, considerando alterações morfológicas e fisiológicas que influenciam a demanda hídrica da cultura ao longo do seu ciclo produtivo.

Embora metodologias indiretas baseadas em modelos de estimativa sejam largamente utilizadas pela praticidade e aplicabilidade, a medição direta da ETc por meio de lisímetros constitui-se na técnica de referência para obtenção de dados experimentais com alta precisão e confiabilidade. Estes instrumentos permitem a mensuração exata do balanço hídrico em parcelas representativas, sendo considerado padrão ouro para validação e calibração dos modelos matemáticos de estimativa.

A integração adequada entre a estimativa da evapotranspiração de referência, o conhecimento detalhado da cultura e o uso criterioso do coeficiente Kc permite o desenvolvimento de estratégias irrigatórias otimizadas, promovendo o uso racional dos recursos hídricos, incremento da produtividade e mitigação dos impactos ambientais adversos. Assim, a compreensão profunda e a aplicação criteriosa dessas metodologias são imperativas para a sustentabilidade agrícola, em especial, para culturas de relevância socioeconômica, como o grão-de-bico, que é cultivado em regiões vulneráveis a restrições hídricas.

Coefficiente de Cultivo (Kc)

O coeficiente de cultivo (K_c) é conceituado como a razão entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o), representando uma medida relativa da capacidade da cultura em atender à demanda evaporativa da atmosfera (Albuquerque, 2000; Rezende et al., 2017). Este parâmetro é essencial para a estimativa das necessidades hídricas das culturas agrícolas, sendo recomendado pela FAO para quantificar a demanda hídrica das culturas de interesse econômico (Lyra et al., 2012).

O valor do K_c é dinâmico e varia ao longo do ciclo fenológico da cultura, definindo a curva característica da planta, que reflete as variações fisiológicas e estruturais que impactam o uso de água (Allen et al., 1998). Embora a evapotranspiração de referência (ET_o) funcione como índice climático da demanda evaporativa, o K_c traduz essa demanda para a escala da cultura, incorporando suas particularidades, o que permite a aplicabilidade e transferência de valores de K_c entre diferentes regiões, desde que as condições climáticas sejam semelhantes (Frevert et al., 1983).

Diversos fatores intrínsecos e extrínsecos podem influenciar o K_c , incluindo a textura e umidade do solo, a profundidade e densidade radicular, além das propriedades fenológicas específicas da planta (Sediyama et al., 1996). Dessa forma, a determinação experimental regional do K_c é recomendada para garantir a precisão na estimativa da ET_c , especialmente em culturas como o grão-de-bico, cultivado em ambientes com variabilidade hídrica significativa (Allen et al., 1998; Silva, 2021).

A curva do coeficiente de cultivo apresenta valores menores na fase inicial do desenvolvimento da planta, aumentando, progressivamente, à medida que o dossel vegetal cobre totalmente o solo, e reduzindo-se ao final do ciclo vegetativo, em função da senescência e retração da área foliar. Calibrações climáticas locais são imprescindíveis para adequar o coeficiente à realidade de cada região, o que permite o manejo eficiente da irrigação e a otimização do uso dos recursos hídricos (Allen et al., 1998).

Perspectivas futuras com a produção de grão-de-bico sob níveis adequados de disponibilidade de água no solo.

A produção de grão-de-bico sob níveis adequados de disponibilidade hídrica no solo apresenta perspectivas promissoras para a sustentabilidade e aumento da produtividade da cultura, sobretudo, em regiões semiáridas. Estudos recentes indicam que o uso eficiente da água, alinhado ao conhecimento aprofundado da fisiologia do grão-de-bico e suas demandas

hídricas, pode aumentar significativamente a tolerância da planta ao estresse hídrico, melhorando a absorção de nutrientes e a produtividade final. O manejo otimizado da irrigação, baseado na evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) e na aplicação precisa do coeficiente de cultivo (K_c), permite a personalização do regime hídrico às necessidades reais da planta em cada estágio fenológico.

Pesquisas demonstram que a irrigação com coeficientes K_c elevados, em torno de 1,1 a 1,25 durante o ciclo de desenvolvimento, resulta em maiores rendimentos, mesmo em anos com altas temperaturas, embora com um custo de eficiência no uso da água. A definição de protocolos de irrigação adaptados às condições locais, mediante monitoramento contínuo de parâmetros morfológicos e potenciais hídricos, é fundamental para maximizar a eficiência da irrigação e a rentabilidade da cultura.

Além disso, a adoção de sistemas de gestão hídrica que contemplam a evapotranspiração real e potencial, associados a dados meteorológicos confiáveis e estudos regionalizados do coeficiente de cultivo, contribuem para a sustentabilidade do cultivo do grão-de-bico, reduzindo perdas por estresse hídrico e melhorando a produtividade, mesmo sob condições climáticas adversas.

Portanto, perspectivas futuras para a produção de grão-de-bico fundamentam-se na integração do conhecimento fisiológico da planta, na precisão dos modelos de demanda hídrica e na aplicação criteriosa dessas informações para o manejo sustentável da irrigação, expandindo o potencial produtivo da cultura em sistemas agrícolas vulneráveis à restrição hídrica.

Conclusões

Esta tese evidenciou a importância do manejo eficiente da disponibilidade hídrica para o cultivo do grão-de-bico em regiões semiáridas, destacando a influência direta do déficit hídrico sobre os processos fisiológicos, o desenvolvimento da planta e a produtividade final. A utilização da evapotranspiração de referência (E_{To}), estimada pelo método Penman-Monteith, combinada com a regionalização e calibração do coeficiente de cultivo (K_c), mostrou-se fundamental para o planejamento irrigatório adequado e otimização do uso da água.

Foi demonstrado que o ajuste do K_c às características fenológicas e às condições climáticas locais permite minimizar o estresse hídrico, melhorar a absorção de nutrientes e elevar a produtividade do grão-de-bico, caracterizando um manejo hídrico mais eficiente e sustentável. A calibração regionalizada do coeficiente de cultivo é imprescindível para que as demandas da planta sejam corretamente atendidas nas diferentes fases do seu ciclo, proporcionando maior resiliência em ambientes onde a água é recurso escasso.

Além disso, a integração dos conhecimentos fisiológicos da planta com dados meteorológicos e estratégias de irrigação contribui para a redução dos impactos ambientais e para a sustentabilidade econômica dos sistemas agrícolas, consolidando o grão-de-bico como uma cultura promissora para diversificação em áreas semiáridas. A adoção de práticas irrigatórias adaptadas às necessidades reais da cultura favorece a segurança hídrica e alimentar, especialmente diante das incertezas climáticas que ameaçam a agricultura nesses ecossistemas.

Por fim, esta pesquisa reforça a necessidade de contínuos estudos regionalizados e experimentais que permitam o aprimoramento dos coeficientes de cultivo e das práticas de manejo hídrico, assegurando a produtividade do grão-de-bico de forma sustentável. O avanço no conhecimento integrado entre fisiologia vegetal, manejo da água e condições climáticas é essencial para enfrentar os desafios atuais e futuros da agricultura em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. C. et al. Transpiration and growth responses by *Eucalyptus* species to progressive soil drying. *Journal of Forestry Research*, v. 33, p. 1529–1543, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01448-z>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. Requerimento de água das culturas para fins de manejo e dimensionamento de sistemas de irrigação localizada. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 54 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 1).
- ALLEN, R. G. et al. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANAPALLI, S. S. et al. Water use and productivity of grain legumes under water deficit conditions: a review. *Agricultural Water Management*, v. 213, p. 348–362, 2019.
- ANJUM, S. A. et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, v. 6, n. 9, p. 2026–2032, 2011.
- ARTIAGA, O. P. et al. Produtividade de grão-de-bico em função da época de semeadura e espaçamento entre linhas no Cerrado Goiano. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 38, n. 1, p. 135–143, 2015.
- AVELAR, A. et al. Caracterização morfoagronômica e produtividade de cultivares de grão-de-bico. *Revista Ceres*, v. 63, n. 2, p. 151–158, 2016.
- AVELAR, A. A. et al. Desenvolvimento e eficiência de uso da água pelo grão-de-bico em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, n. 4, p. 2984–2994, 2018.

- BASU, S.; RAMEGOWDA, V.; KUMAR, A.; PEREIRA, A. Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.7678.1>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- BIANCHI, L.; GERMINO, G. H.; DE ALMEIDA SILVA, M. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. *Acta Iguazu*, v. 5, n. 4, p. 15–32, 2016.
- BRODERSEN, C. R.; RODDY, A. B.; WASON, J. W.; MCELDRONE, A. J. Functional status of xylem through time. *Annual Review of Plant Biology*, v. 70, p. 407–433, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100455>.
- BRUTSAERT, W. *Hydrology: An introduction*. 1. ed. New York; Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 117-158. DOI: <https://doi.org/10.21170/geonorte.2021.v.12.n.39.2643>.
- CAI, J.; LIU, Y.; LEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 145, p. 22–35, 2007.
- CASTIGLIO, V. S.; CAMPAGNOLO, K.; KOBAYAMA, M. Análise da evapotranspiração potencial no município de Cambará do Sul/RS. *Revista Geonorte*, v. 12, n. 39, p. 2643, 2021.
- CHAUHAN, J. S. et al. Chickpea (*Cicer arietinum* L.) physiology and cultivation: recent advances. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, v. 87, n. 7, p. 865–872, 2017.
- CHAVES, L. H. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Jaboticabal-SP. 2015.
- COSTA, R. C. et al. Aspectos agronômicos e perspectivas do cultivo de grão-de-bico no Brasil. *Revista Agro@ambiente On-Line*, v. 17, n. 1, p. 1–13, 2023.
- DANELUZZI, G. Estresse hídrico nas plantas: o que é, impactos e estratégias de manejo. *Agroadvance*, 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-estresse-hidrico-nas-plantas/>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Yield response to water*. Rome: FAO, 1979.
- FAO. Food and Agriculture Organization of The United Nations. *Base de dados FAOSTAT*, 2025. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em: 14 maio 2025.
- FAOSTAT. *Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database*. Rome: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- FAROOQ, M. et al. Improving drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) through physiological and biochemical adjustments. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 129, p. 69–77, 2018.

- FIGEZE, S. L.; GUIMARÃES, V. F. Aplicação de reguladores vegetais em plantas submetidas ao déficit hídrico. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 38, n. 3, p. 369–376, 2015.
- FRANÇA, M. V.; MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M.; SABOYA, L. M. F.; ROLIM NETO, F. C.; ARAÚJO, W. R. Analysis of evapotranspiration estimation by different models for Amparo de São Francisco – Sergipe. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 13, e514101321505, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.21505>.
- FREVERT, D. R.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *Journal of Irrigation and Drainage*, v. 109, p. 265–270, 1983.
- FRIZZONE, J. A. *Análise de decisão econômica em irrigação*. Piracicaba: ESALQ, 2004. 371 p. (ESALQ. Série Didática, 17).
- GAUR, P. M.; TRIPATHI, S.; GOWDA, C. L. L.; RANGA RAO, G. V.; SHARMA, H. C.; PANDE, S.; SHARMA, M. *Manual de produção de sementes de grão-de-bico* [S. l.], 2010. Disponível em: <http://oar.icrisat.org/10276/>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- GAVILAN, P.; BERENGENA, J.; ALLEN, R. G. Measuring versus estimating net radiation and soil heat flux: impact on Penman–Monteith reference ET estimates in semiarid regions. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 89, n. 3, p. 275–286, 2007.
- GOMIDE, R. L. Requerimento de água de culturas. In: RIOS, S. de A.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. (Ed.). *Irrigação: dos fundamentos ao manejo de sistemas*. Brasília, DF: Embrapa, 2021, p. 135–162.
- GRAY, S. B.; BRADY, S. M. Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*, v. 419, n. 1, p. 64–77, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- GUPTA, A.; MEDINA, A. R.; DELGADO, A. I. C. A fisiologia das respostas das plantas à seca. *Ciência*, v. 368, p. 266–269, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaz761>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- JUSTINO, F. et al. Impactos das mudanças climáticas na demanda hídrica da agricultura. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 1, p. 123–136, 2019.
- KAPLAN, M. et al. Influence of irrigation on yield and quality of chickpea in semi-arid conditions. *Journal of Plant Nutrition*, v. 42, n. 10, p. 1135–1146, 2019.
- KNIGHTS, E. J.; HOBSON, K. B. *Chickpea breeding and management*. Wallingford: CABI, 2016.
- LATIF, S. et al. Insect-mediated pollination in chickpea: myth or reality? *Journal of Insect Science*, v. 19, n. 2, p. 12–19, 2019.

- LEAKEY, A. D. et al. Water use efficiency as a constraint and target for improving the resilience and productivity of C3 and C4 crops. *Annual Review of Plant Biology*, v. 70, p. 781–808, 2019.
- LIBARDI, P. L. et al. *Manejo da água na agricultura: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2019.
- LYRA, G. B.; SILVEIRA, E. L.; PEREIRA, C. R.; SILVA, L. D. B.; SILVA, G. M. Coeficiente da cultura da cana-de-açúcar no estágio inicial de desenvolvimento em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Irriga*, v. 17, n. 1, p. 102–113, 2012.
- MARERI, L.; PARROTTA, L.; CAI, G. Environmental stress and plants. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 10, p. 5416, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23105416>. Acesso em: 26 ago. 2024.
- MEDICI, L. O.; MAJEROWICZ, N.; MARTIM, S. J. *Relações hídricas: o contínuo solo-planta-atmosfera*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2023.
- MELO, A. A. R. Respostas fisiológicas e bioquímicas de plantas leguminosas ao déficit hídrico. *Physiotek Letters*, v. 1, p. 6–8, 2021. Disponível em: https://physiotek.com.br/wp-content/uploads/2021/03/2_vo11_6-8_andressamello-.pdf. Acesso em: 30 jun. 2025.
- MOHAMMED, A.; TANA, T.; SINGH, P.; MOLLA, A.; SEID, A. Identifying best crop management practices for chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Northeastern Ethiopia under climate change condition. *Agricultural Water Management*, v. 194, p. 68–77, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.022>.
- NASCIMENTO, W. M. et al. *Aspectos agronômicos e produtivos do grão-de-bico*. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2016.
- NASCIMENTO, W. M. et al. *Grão-de-bico: o cultivo no Brasil*. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2016.
- NUNES, A. M. C.; NUNES, L. R. L.; RODRIGUES, A. J. O.; UCHÔA, K. S. A. Silício na tolerância ao estresse hídrico em tomateiro. *Revista Científica Rural*, v. 21, n. 2, p. 239–258, 2019. DOI: <https://doi.org/10.30945/rcr-v21i2.2658>.
- OLIVEIRA, C. Como ocorre e quais os efeitos do estresse hídrico nas plantas. *Aegro*, 2022. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/estresse-hidrico-nas-plantas/>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- PANG, J. et al. Response of chickpea to terminal drought: root system architecture and productivity under contrasting moisture regimes. *Field Crops Research*, v. 200, p. 70–80, 2016.

- PLANTIER, R. D. A importância da água às plantas? *Trapp*, 2019. Disponível em: <https://www.trapp.com.br/pt/curiosidades/a-importancia-da-agua-as-plantas/>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- QUEIROGA, V. P.; GIRÃO, Ê. G.; ALBUQUERQUE, E. M. B. Grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.): tecnologias de plantio e utilização. Campina Grande: AREPB, 2021.
- RAMAMOORTHY, P.; LAKSHMANAN, K.; UPADHYAYA, H. D.; VADEZ, V.; VARSHNEY, R. K. Root traits confer grain yield advantages under terminal drought in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crops Research*, v. 201, p.146–161,2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.11.004>. Acesso em:17 nov. 2025.
- RAO, N. K. et al. *Manual of chickpea production*. Aleppo: ICARDA, 2010.
- RAZA, M. A. S.; SALEEM, M. F.; KHAN, I. H.; HUSSAIN, M. B.; SHAH, G. M. Amelioration in growth and physiological efficiency of sunflower (*Helianthus annuus* L.) under drought by potassium application. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 49, n. 18, p. 2291-2300, 2018.
- REZENDE, M. K. A.; FLUMIGNAN, D. L.; FREITAS, P. S. L.; ARAÚJO, A. L. F.; SOUZA, C. H. M. *Coeficiente de cultivo do milho safrinha para região de Dourados-MS*. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167867/1/1.coeficiente-cultivo>.
- RIBEIRO, L. F. et al. Panorama do grão-de-bico no Brasil: produção, consumo e importações. *Revista de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 1, n. 2, p. 67–75, 2021.
- SALEHI-LISAR, S. Y.; BAKHSHAYESHAN-AGDAM, H. Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. In: *Drought Stress Tolerance in Plants*, v. 1, p. 1–16, 2016.
- SANTOS, T. B. et al. Respostas fisiológicas à seca, salinidade e estresse térmico nas plantas: uma revisão. *Stresses*, v. 1, p. 113–135, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/stresses2010009>.
- SATO, H. et al. Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. *Plant Journal*, v. 117, p. 1873–1892, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.16612>.
- SCHULZE, E. D.; BECK, E.; MÜLLER-HOHENSTEIN, K. *Plant ecology*. Springer, 2005.
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 4, n. 1, p. I–XII, 1996.
- SEIDEL, E. P. et al. Balanço hídrico e a sustentabilidade do uso da água na agricultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 3, p. 207–213, 2019.

- SELEIMAN, M. F. et al. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants (Basel)*, v. 10, n. 2, p. 259, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020259>.
- SILVA, L. D. et al. Efeitos do óxido nítrico exógeno em plantas de milho submetidas a déficit hídrico. 2022.
- SILVA, T. F. et al. Caracterização nutricional de cultivares de grão-de-bico adaptadas ao Cerrado brasileiro. *Ciência Rural*, v. 51, n. 10, p. e20201198, 2021.
- SMITH, M. *Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. Rome: FAO, 1991.
- TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TARDIEU, F.; SIMONNEAU, T.; MULLER, B. The physiological basis of drought tolerance in crop plants: a scenario-dependent probabilistic approach. *Annual Review of Plant Biology*, v. 69, p. 733–759, 2018.
- TARIQ, M. et al. Reconnoitering the capabilities of nodule endophytic *Pantoea dispersa* for improved nodulation and grain yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 39, n. 3, p. 85, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03525-3>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- VARSHNEY, R. K. et al. Draft genome sequence of chickpea (*Cicer arietinum*) provides a resource for trait improvement. *Nature Biotechnology*, v. 31, n. 3, p. 240–248, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nbt.2491>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- WANG, X.; WU, Z.; ZHOU, Q.; WANG, X.; SONG, S.; DONG, S. Physiological response of soybean plants to water deficit. *Frontiers in Plant Science*, v. 12, n. 809692, p. 1–12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.809692>.
- WIJewardana, C. et al. Soil moisture effects on chickpea productivity and seed quality. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 205, n. 1, p. 1–10, 2019.
- XING, Z.; CHOW, L.; MENG, F. R.; REES, H. W.; STEVENS, L.; MONTEITH, J. Validating evapotranspiration equations using Bowen ratio in New Brunswick. *Sensors*, Lausanne, v. 8, p. 412–428, 2008.
- ZAREEN, S.; ALI, A.; YUN, D. J. Significance of ABA biosynthesis in plant adaptation to drought stress. *Journal of Plant Biology*, v. 67, p. 175–184, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12374-024-09425-9>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- ZARGAR, S. M.; GUPTA, N.; NAZIR, M.; MAHAJAN, R.; MALIK, F. A.; SOFI, N. R.; SALGOTRA, R. K. Impact of drought on photosynthesis: molecular perspective. *Plant Gene*, v. 11, p. 154–159, 2017.

ZIA, R. et al. Plant survival under drought stress: implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, v. 242, p. 126626, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126626>. Acesso em: 3 jul. 2025.

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 9, p. 1–12, 2016.

4 CAPÍTULO II

4.1 Artigo 1 - Determinação do coeficiente de cultivo de duas variedades de grão-de-bico no norte de Minas Gerais

RESUMO

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma leguminosa muito importante e promissora para o cultivo no Cerrado e em regiões semiáridas, no entanto, os parâmetros de consumo hídrico e coeficiente de cultura (Kc) são limitados por cultivar para o manejo da irrigação, demandando estudos sobre suas necessidades hídricas para um manejo sustentável. Assim, este estudo teve como objetivo determinar as necessidades hídricas e o Kc para duas cultivares de grão-de-bico. A evapotranspiração de referência (ET_o) da cultura foi estimada pelo método de Penman-Monteith com dados meteorológicos registrados dentro da casa de vegetação. A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi obtida por Lisímetros de drenagem. A pesquisa foi realizada no campo experimental do ICA Campus Montes Claros, com 12 lisímetros. O Kc foi determinado pela relação ET_c/ET_o. As cultivares de grão-de-bico avaliadas foram, BRS Aleppo e BRS Toro. A ET_c média ao longo do ciclo foi de 4,8 e 5,4 mm dias⁻¹ para as cultivares BRS Aleppo e BRS Toro, respectivamente. A ET_c média para as respectivas cultivares foi de 1,86 e 1,84 mm dias⁻¹ na fase inicial, atingindo 3,26 e 3,4 mm dias⁻¹ na fase de crescimento da cultura e 5,55 e 8,16 mm dias⁻¹ na fase de maturação da cultura. Os valores de Kc variaram de 0,29; 0,49; 1,28 e 1,0 para BRS Toro e 0,30; 0,47; 1,0 e 0,68 para BRS Aleppo. A cultivar BRS Toro apresentou maior Kc e maior demanda hídrica, porém maior duração do valor máximo devido ao hábito de crescimento indeterminado. A cultivar BRS Aleppo foi a que apresentou menor Kc e menor demanda hídrica, a variação do Kc correlacionou-se positivamente com os padrões das fases da cultura. Isso demonstra a importância da determinação do Kc para aumentar a eficiência no manejo da irrigação por cultivar, em vez da adoção de valores generalizados de Kc. A ET_o média foi 6,04 mm dia⁻¹, com ET_c acumulada de 410,4 mm para BRS Toro e 310,08 mm, respectivamente, a reposição de água foi suspensa aos 92 dias para as duas cultivares.

Foi estimado o Kc médio para duas cultivares de grão de bico e para o Norte de Minas Gerais, os valores de Kc variaram de 0,57; 0,82; 0,99 e 0,86. O Kc obtido nesse trabalho pode ser indicado para cultivo de grão de bico em regiões com mesmas características climáticas do Norte de Minas Gerais.

Palavras-chave: *Cicer arietinum* L.; lisímetro de drenagem; exigência hídrica; BRS Aleppo; BRS Toro.

ABSTRACT

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is a very important and promising legume for cultivation in the Cerrado and semiarid regions. However, water consumption and crop coefficient (Kc) parameters are limited by cultivar for irrigation management, requiring studies on their water requirements for sustainable management. Therefore, this study aimed to determine the water requirements and Kc for two chickpea cultivars. Reference evapotranspiration (ET_o) of the crop was estimated by the Penman-Monteith method using meteorological data recorded inside the greenhouse. Crop evapotranspiration (ET_c) was obtained using mini-lysimeters. The research was conducted in the experimental field of the ICA Campus Montes Claros, with 12 drainage lysimeters. Kc was determined by the ET_c/ET_o ratio. The chickpea cultivars evaluated were Cicero, BRS Aleppo, and BRS Toro. The average ET_c throughout the cycle was 4.8 and 5.4 mm/day⁻¹ for the BRS Aleppo and BRS Toro cultivars, respectively. The average ET_c for the respective cultivars was 1.86 and 1.84 mm/day⁻¹ in the initial phase, reaching 3.26 and 3.4 mm/day⁻¹ in the growth phase and 5.55 and 8.16 mm/day⁻¹ in the maturity phase. The Kc values ranged from 0.29, 0.49, 1.28, 1.0 for BRS Toro and 0.30, 0.47, 1.0 to 0.68 for BRS Aleppo. The BRS Toro cultivar presented higher Kc and greater water demand, but a longer duration of the maximum value due to its indeterminate growth habit. The BRS Aleppo cultivar presented the lowest Kc and water demand. Kc variation correlated positively with crop phase patterns. This demonstrates the importance of determining Kc to increase efficiency in irrigation management by cultivar, rather than adopting generalized Kc values. The average ET_o was 6.04 mm/day⁻¹, with accumulated ET_c of 410.4 mm for BRS Toro and 310.08 mm, respectively. Water replenishment was suspended after 92 days. The average Kc was estimated for two chickpea cultivars and for Northern Minas Gerais, with Kc values ranging from 0.57, 0.82, 0.99, and 0.86. The Kc obtained in this study can be recommended for chickpea cultivation in regions with the same climatic characteristics as Northern Minas Gerais.

Keywords: *Cicer arietinum* L.; drainage lysimeter; water requirement; BRS Aleppo; BRS Toro.

INTRODUÇÃO

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma das leguminosas mais antigas e amplamente consumidas, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. Sua produção ocorre principalmente no Oriente Médio, Ásia e América do Norte (Mohamed et al., 2017). Caracteriza-se por raízes longas que permitem o acesso à água em profundidades maiores no

solo. Por isso, o manejo adequado da irrigação é fundamental para atender à demanda hídrica da cultura de forma eficiente (Talebnejad & Sepaskhah, 2015). A determinação precisa da demanda hídrica nos sistemas de cultivo é importante para o manejo hidrológico (Libardi et al., 2019), especialmente em períodos de seca, quando surgem conflitos pelo uso da água entre a agricultura e outras atividades (Justino et al., 2019).

A irrigação pode ser gerida por meio de métodos que estimam as necessidades hídricas da cultura. O método FAO-56 é amplamente utilizado para calcular a evapotranspiração de referência (ET_o) (Allen et al., 1998). Quando combinado com o coeficiente de cultivo (K_c), por meio do produto ET_o x K_c, obtém-se a evapotranspiração da cultura (ET_c). A ET_o é calculada a partir de variáveis meteorológicas locais, enquanto o K_c deve ser determinado experimentalmente (Anapalli et al., 2019).

A evapotranspiração pode ser determinada de forma direta por meio de equipamentos denominados lisímetros ou evapotranspirômetros, ou indireta, por equações empíricas, as quais têm sido propostas para estimar a evapotranspiração de referência ET_o (Hillel 1971) definiu os lisímetros como recipientes onde se procura representar as condições naturais do sistema solo-água-plantas, que possibilitam regular e controlar convenientemente os processos que ocorrem no perfil natural do solo é muito utilizados em pesquisa agrometeorológica para determinar a evapotranspiração (Pereira et al., 1997). A evapotranspiração de referência (ET_o) é definida como sendo aquela de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23, e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m⁻¹, que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem falta de água, (Smith 1991).

A lisimetria, basicamente, propicia o cálculo da medida volumétrica das águas que entram e saem do sistema que pode ou não ser coberto por vegetal, os lisímetros mais empregados são: o de drenagem; de lençol freático constante e o de pesagem, lisímetro de drenagem baseia-se no princípio de conservação de massa de água em um volume de solo (Aboukhaled et al. 1986).

O manual 56 da FAO (Allen et al., 1998) apresenta valores de K_c para o grão-de-bico, mas não fornece o valor específico para a fase I da cultura, sugerindo valores gerais usados para outras leguminosas. A utilização do K_c de forma generalizada, entre espécies semelhantes ou cultivares de hábitos de crescimento diferentes, pode prejudicar a estimativa da demanda de irrigação, comprometendo a eficiência no uso da água e a produtividade (Anapalli et al., 2019).

As cultivares de grão-de-bico têm morfologias distintas, especialmente no formato das folhas, o que pode resultar em consumo de água diferenciado. A hipótese deste estudo é que as

cultivares BRS Aleppo e BRS Toro exibem comportamentos diferentes de K_c ao longo do ciclo de desenvolvimento. O objetivo deste trabalho foi determinar a evapotranspiração da cultura e o coeficiente de cultivo de duas cultivares de grão-de-bico e mensurar a demanda hídrica do grão de bico, pelo método de lisímetria em ambiente protegido em regiões de clima semiárido.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e condições experimentais

Este estudo foi conduzido de abril a agosto de 2023 na área experimental da Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, campus Montes Claros – MG, a uma altitude média de 638 metros e coordenadas geográficas 16°43'57,5"S, 43°52'21,4"W (Figura 1). O clima da região é classificado como Aw, caracterizado por invernos secos e verões chuvosos. Foi utilizado um ambiente protegido com teto em arco de 3 m de largura por 6 m de comprimento (18 m²), altura do pé-direito de 4,20 m coberto de filme plástico de polietileno de baixa densidade de 15 µm de espessura. Para a determinação da evaporação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura, foram utilizados doze lisímetros de drenagem construídos com vasos plásticos com capacidade de 50 litros, os quais foram perfurados na base e no orifício onde ajustou-se uma mangueira de condução com 20 cm de comprimento e uma polegada de diâmetro interno, conectando-a a um recipiente plástico com capacidade de 2 litros para controle e coleta da água de drenagem. I fundo de cada vaso colocou-se uma manta geotextil não tecida, para evitar a perda de solo durante a drenagem. Logo acima deste foi colocado uma camada de 3 cm de brita, outra de areia lavada grossa seguido de outra cobertura de manta geotextil para facilitar a drenagem da água.

O solo utilizado apresentava textura média, foi peneirado e homogenizado (Fig1. A). Cada lisímetro montado recebeu 40 kg de solo, após a padronização (Fig1. B)

Figura 1 (A, B) – Bancada mostrando a localização, montagem e disposição dos lisímetros na estufa



Na estufa, 12 lisímetros foram dispostos aleatoriamente sob uma bancada de apoio, com quatro lisímetros para cada variedade e quatro para grama esmeralda (Fig. C). Aos 25 dias, as mudas foram transplantadas para lisímetros de 50 L, com avaliações iniciadas aos 28 dias.

Figura 1 (C) – Bancada mostrando a localização montagem e disposição dos lisímetros na estufa localizada na área experimental da Universidade Federal de Minas Gerais – ICA, campus de Montes Claros



Foi usado um latossolo vermelho-amarelo, distrófico, textura franco-arenosa; ácido, para enchimento dos vasos na camada de 0 a 30 cm. Foram feitas coletas de amostras de solo para caracterização físico-química, com os seguintes atributos químicos:

pH (H₂O) = 4,1; P (Mehlich 1) = 1,4 mg dm⁻³; P remanescente = 33,0 mg L⁻¹; K (Mehlich 1) = 17,3 mg dm⁻³; Ca = 0,14 cmolc dm⁻³; Mg = 0,07 cmolc dm⁻³; Al (KCl) = 0,36 cmolc dm⁻³; H+Al = 1,82 cmolc dm⁻³; SB = 0,25 cmolc dm⁻³; t = 0,61 cmolc dm⁻³; m = 58,6%; T = 2,07 cmolc dm⁻³; V = 2,28%; Matéria Orgânica = 0,73 dag kg⁻¹; Carbono Orgânico = 0,42 dag kg⁻¹; Areia = 59,1 dag kg⁻¹; Areia fina = 16,9 dag kg⁻¹; Silte = 8,0 dag kg⁻¹; Argila = 16,0

dag kg⁻¹. O pH foi corrigido com óxido de cálcio e a fertilidade ajustada com 10 g do formulado NPK 4-13-8 por lisímetro (Nascimento et al., 2016).

Cultivares de grão-de-bico delineamento e condução do experimento

Foram utilizadas duas cultivares de grão-de-bico, BRS Aleppo, BRS Toro, desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). As cultivares apresentaram características distintas, com bom desempenho e adaptabilidade às condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro e foram caracterizadas quanto à duração do ciclo, hábito de crescimento, altura máxima da planta, tipo de folha.

O experimento ocorreu de 25 de abril a 15 de agosto de 2023, com semeadura em 25/04/2023 e colheita em 15/08/2023, totalizando 110 dias após a semeadura (DAE), as duas cultivares utilizadas, apresentam características semelhantes como ciclo de 120 dias, hábito de crescimento indeterminado e altura de plantas variando entre 66 e 80 cm para as variedades, BRS Aleppo e BRS Toro respectivamente.

O plantio foi realizado, em bandejas de polietileno e aos 20 dias ocorreu o transplantio das mudas para os lisímetros, na adubação de fundação, utilizou-se o adubo misto NPK (5-30-15), nas quantidades de 10 g de N, 60 g de P₂O₅ e 5g de K₂O ha⁻¹ por lisímetro, posteriormente foi realizada adubação de cobertura repetindo a adubação de fundamentação.

Durante a condução do experimento, foi realizado controle fitossanitário com aplicação do inseticida Decis, concentração de dose de 15ml/20L de água aos 50 dias após a emergência, foram plantados oito lisímetros, sendo quatro para variedade Aleppo e quatro para Toro para Determinação da ET_c e K_c, porém outros quatros, foram transplantados com grama batatais, *Paspalum notatum* para determinar a evapotranspiração de referência (ET_o).

A determinação da evaporação e evapotranspiração da cultura do grão-de-bico foram determinadas pelo método de lisimetria, que consiste no balanço hídrico, sendo fundamentada na lei da conservação das massas, apresentada por Reichardt (1985).

Equação 1:

$$P + I - D - ET_c = \pm h \quad (1)$$

Em que:

P: precipitação natural, em mm; I: irrigação, em mm; D: drenagem profunda, em mm; ET_c: evapotranspiração da cultura, em mm; h: variação da armazenagem da água no solo dentro dos lisímetros, em mm. Considerando que a aplicação da lâmina de irrigação sempre elevava à

umidade do solo em todos os lisímetros à capacidade de campo, a variação no armazenamento era igual à zero, como também em virtude da cobertura plástica da casa de vegetação a precipitação pluvial foi desconsiderada. Assim a equação para o cálculo da evaporação e evapotranspiração da cultura ficou reduzida à seguinte expressão:

(2)

$$ETc = I - D$$

Onde: ETc= evapotranspiração, em mm; I= o volume de água aplicado (ml/vaso); D é o volume drenado (mL/vaso). A evapotranspiração da cultura, a evapotranspiração de referência e evaporação do solo, foram determinadas a cada três dias. a coleta de dados iniciou no dia 15 de maio, que corresponde ao 20º dia após a semeadura (DAS), para a aferição do volume coletado nos drenos utilizou-se uma proveta graduada em milímetros e a leitura ocorreu a cada 72 horas de forma que os procedimentos iniciaram sempre por volta de 13:00 horas e terminaram às 16:00 horas.

Após a coleta, era aplicado a lâmina de reposição da água, dessa forma era quantificado a evapotranspiração de acordo com o balanço hídrico determinado pelos lisímetros, ajustado, conforme a equação 2.

A evapotranspiração da cultura (ETc), que inclui a água transpirada pelas plantas e a evaporada da superfície do solo, foi estimada considerando a umidade do solo e as condições climáticas na casa de vegetação, levando em consideração os eventos de reposição de água e as quantidades de água drenada.

Inicialmente o solo foi saturado e em seguida colocado em capacidade de campo, observando a lâmina drenada, com o objetivo de determinar a primeira lâmina diária (I), em seguida foi possível aplicar as lâminas subsequentes observando cuidadosamente o consumo diário (I – D), aplicada (I) no dia anterior a atual.

Para o cálculo dos coeficientes de cultura do grão-de-bico o ciclo da cultura foi dividido em quatro fases fenológicas, sendo: fase I inicial: da emergência aos 28 dias após a emergência (DAE); FaseII de crescimento: a planta ainda está em desenvolvimento (29 - 56 dias), Fase III intermediária: a planta atinge fase estacionária de desenvolvimento (57 - 85 dias) e FaseIV final: a planta entra na fase de maturação (86 - 110 dias).

O coeficiente de cultura foi determinado por fases, conforme metodologia proposta por Allen et al. (1998) e os dados diários de temperatura, umidade, pressão do ar, velocidade do vento a dois metros e radiação solar foram coletados pela estação meteorológica local do BDMEP/INMET, Montes Claros. Esses dados foram utilizados para estimar a

evapotranspiração de referência (ET_o) por meio da equação de Penman-Monteith/FAO-56 (Allen et al., 1998), que demonstrou ser eficiente em ambientes protegidos (Morille et al., 2013).

A evapotranspiração da cultura (ET_c), foi medida a cada três dias, com auxílio de uma proveta graduada de 1000 ml. A ET_c foi calculada pela diferença entre a primeira e a última leitura de cada intervalo de três dias, para converter esse valor em milímetros, considerou-se a densidade da água (1 g/cm³) e a área do vaso, que é de 1142,6 cm², dessa forma, obteve-se a evapotranspiração em milímetros (mm), com os dados diários de evapotranspiração de referência (ET_o) e da cultura (ET_c), foi possível calcular os coeficientes de cultura (K_c) nas diferentes fases fenológicas do grão-de-bico, de acordo com a metodologia de Doorenbos & Pruitt (1975).

A relação entre a ET_c, obtida pelo balanço de água nos lisímetros equação (2): e a ET_o é expressa pela equação (3), o modelo de Penman-Monteith (Padrão-FAO) é descrito por Allen et al. (1998).

Equação 3:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma ((900 U_2) / T + 237)) U_2 (ea - es)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)}$$

Onde:

- **ET_o** = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹)
- **R_n** = saldo de radiação diário (MJ m⁻² dia⁻¹)
- **G** = fluxo total diário de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹)
- **T** = temperatura média diária do ar (°C)
- **U₂** = velocidade do vento média diária a 2 m (m s⁻¹)
- **(ea - es)** = déficit de saturação de vapor médio diário (kPa)
- **Δ** = declividade da curva de pressão vapor em relação à temperatura (kPa °C⁻¹)
- **γ** = coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹)

O coeficiente de cultivo (K_c) foi calculado com base na relação entre a evapotranspiração da cultura (ET_c), estimada pela coleta dos lisímetros, e a evapotranspiração de referência (ET_o), obtida pela equação de Penman-Monteith, ambos os valores foram considerados em escala diária, conforme o método do coeficiente de cultura única (Equação 4) de Allen et al. (1998), utilizando seguinte equação. Equação (4)

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Onde:

- **K_c**: coeficiente da cultura (adimensional)
- **ET_c**: evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹)
- **ET_o**: evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹)

O K_c e evapotranspiração da cultura foram determinados por fases de desenvolvimento da cultura individualmente por variedade.

Equação (5):

$$K_c = ET_c / ET_o$$

Onde:

- **K_c**: coeficiente de cultivo (adimensional)
- **ET_c**: evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹)
- **ET_o**: evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Condições meteorológicas do período experimental

A Figura 1 apresenta a variação mensal da temperatura do ar (máxima, média e mínima) e da umidade relativa durante o período experimental, conforme registros do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). As condições ambientais observadas refletem o comportamento típico do clima da região no período de outono a primavera, caracterizado por temperaturas amenas e umidade relativa moderada.

As temperaturas médias oscilaram entre 20 e 25 °C, com máximas próximas a 32 °C e mínimas em torno de 15 °C. Essa faixa térmica encontra-se dentro do intervalo considerado adequado para o crescimento do grão-de-bico, conforme relatado por Singh et al. (2016), que indicam temperaturas ideais entre 18 °C e 28 °C para o desenvolvimento vegetativo e

reprodutivo da cultura. Valores superiores a 30 °C, observados pontualmente nos meses de abril e setembro, podem acelerar a taxa de evapotranspiração e reduzir o período de florescimento, enquanto temperaturas abaixo de 15 °C tendem a retardar a germinação e o alongamento do caule.

A umidade relativa do ar apresentou tendência decrescente ao longo do ciclo, com valores médios variando de aproximadamente 65 % em abril para 40 % em setembro. Essa redução progressiva coincide com o avanço da estação seca e com o aumento da demanda evaporativa da atmosfera. De acordo com Allen et al. (1998), a diminuição da umidade relativa intensifica o déficit de pressão de vapor, promovendo maior perda de água pelas folhas e, conseqüentemente, elevando a evapotranspiração potencial (ET_o).

A radiação solar média foi de 21,1 MJ m⁻² dia⁻¹, variando de 21,1 a 28,6 MJ m⁻², enquanto a velocidade média do vento foi de 1,0 m s⁻¹. Esses valores indicam condições favoráveis à fotossíntese e à troca gasosa, com moderado potencial de perda de água pelo dossel (Tabela 1). Em conjunto, as variáveis meteorológicas revelam ambiente estável e propício ao desenvolvimento do grão-de-bico, embora a redução da umidade e o aumento da temperatura no final do período possam ter induzido leve estresse hídrico, especialmente nas fases de enchimento de grãos.

Tabela 1: Valores médios de temperatura (máx e mín.), umidade relativa do ar (média), velocidade do vento e radiação solar, no período de 25 de abril a 15 de agosto de 2023.

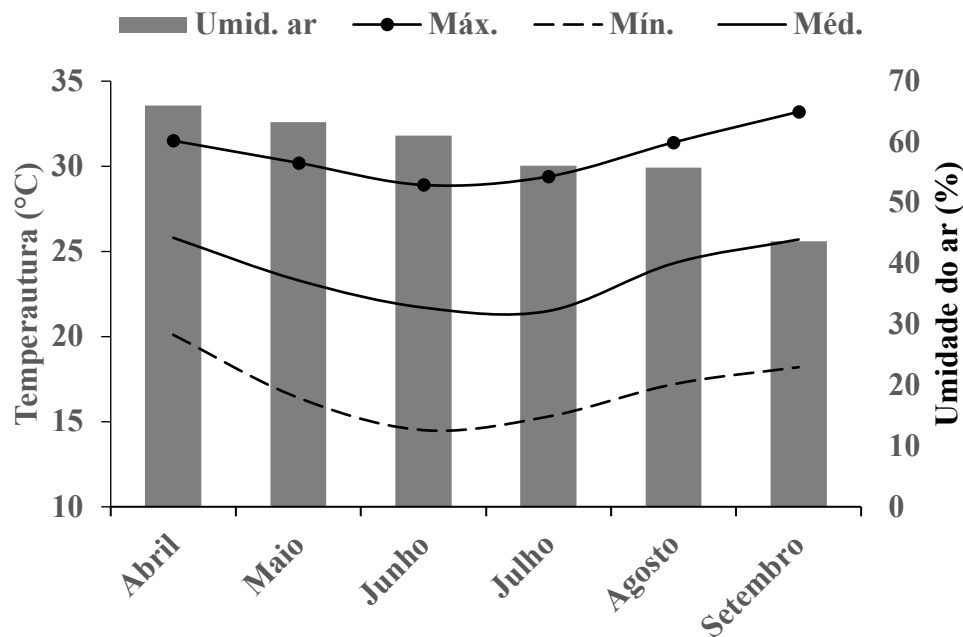
Meses	Radiação Solar (MJ m ⁻²)	Temp. Max(°C)	Temp. mín(°C)	Umidade relativa do Ar (%)	Vento, velocidade Máxima (m/s)	Vento, velocidade Máxima (m/s)
Abril	21,1	31,5	20,1	66,0	4,5	1,1
Mai	28,6	30,2	16,4	63,3	4,0	0,8
Junho	26,3	28,9	14,5	61,0	3,8	0,8
Julho	25,3	29,4	15,3	56,1	5,0	1,1
agosto	24,5	31,4	17,2	55,8	3,5	1,0
Média	21,1	30,2	16,4	61,0	4,0	1,0

Fonte: BDMEP/INMET. Disponível em: <https://portal.inemet.gov.br/>

Essas condições climáticas são particularmente relevantes para a interpretação das curvas de K_c e ET_c apresentadas nas Figuras 3 e 4, uma vez que a variação da temperatura e da umidade relativa afeta diretamente a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman–Monteith. Assim, a compreensão detalhada do ambiente meteorológico é

essencial para avaliar o desempenho hídrico das cultivares BRS Toro e Aleppo e a adequação dos coeficientes de cultura determinados.

Figura 2 – Dados meteorológicos: umidade relativa (%), temperatura máxima, média e mínima (°C), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023)



Fonte: BDMEP/INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inemet.gov.br/>

Nascimento et al. (2016) relataram que altas temperaturas encurtam o crescimento vegetativo e causam abortamento de flores, reduzindo a produção, no entanto, durante este experimento, não houve aborto de flores nem de vagens.

As condições meteorológicas registradas durante o experimento caracterizaram-se por temperaturas moderadas, radiação solar elevada e declínio gradual da umidade relativa do ar, configurando ambiente típico da transição entre o outono e a estação seca. Esse cenário proporcionou condições térmicas favoráveis ao desenvolvimento do grão-de-bico, com valores médios de temperatura e radiação adequados à fotossíntese e ao acúmulo de biomassa.

A redução da umidade relativa e o aumento gradual da temperatura a partir de julho intensificaram a demanda evaporativa da atmosfera, refletindo-se em maiores valores de evapotranspiração de referência (ET_o) nas fases finais do ciclo. Esses fatores climáticos explicam parte das variações observadas nas curvas de coeficiente de cultura (K_c) e de evapotranspiração da cultura (ET_c) discutidas nas Figuras 3 e 4, sobretudo o aumento da demanda hídrica nas fases de florescimento e enchimento de grãos.

Assim, o monitoramento detalhado das variáveis meteorológicas foi essencial para interpretar as respostas fisiológicas das cultivares BRS Toro e Aleppo. A combinação entre moderada disponibilidade hídrica e ambiente termicamente estável favoreceu a diferenciação entre as variedades, permitindo avaliar de forma precisa a eficiência de uso da água e a adaptação de cada cultivar às condições semiáridas da região experimental.

A Figura 2 mostra a variação do coeficiente de cultura Toro (KcT) e coeficiente de cultura Alepo (KcA), evapotranspiração da cultura (ETc Toro e ETc Aleppo) e evapotranspiração de referência (ETo) ao longo das quatro fases do desenvolvimento das cultivares de grão-de-bico. Os valores de KcT e ETc T aumentam gradualmente da Fase I (28 DAP) até a Fase III (84 DAP), atingindo o ponto máximo, com posterior redução na Fase IV (110 DAP). Esse padrão indica maior demanda hídrica na fase reprodutiva, seguida por uma queda associada à senescência da cultura.

A curva de KcA e $ETcA$ apresenta comportamento semelhante, mas com valores consistentemente mais baixos, sugerindo uma estimativa mais precisa da demanda real da cultura em condições protegidas. Isso reforça a importância de utilizar coeficientes ajustados às condições locais e ao manejo adotado.

A ETo , representada pelas barras em cinza, varia menos ao longo do ciclo e não acompanha diretamente os picos de ETc . Isso evidencia que o consumo hídrico da cultura foi mais fortemente influenciado pelo estágio fenológico do que pelas variações atmosféricas. Na Fase III, apesar de uma leve queda da ETo , observa-se o pico de ETc , destacando o impacto do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo no aumento da transpiração.

A análise gráfica, na Figura 2 confirma que a demanda hídrica do grão-de-bico varia com o desenvolvimento fenológico, com pico na fase reprodutiva. A utilização de coeficientes ajustados (KcA) permite estimativas mais realistas da ETc , especialmente em ambientes protegidos. A ETo mostrou menor influência sobre a variação da ETc , indicando que o estágio da cultura é o principal fator determinante para o manejo da irrigação. O uso de curvas ajustadas por fase contribui para o planejamento hídrico eficiente, com menor risco de super ou subirrigação.

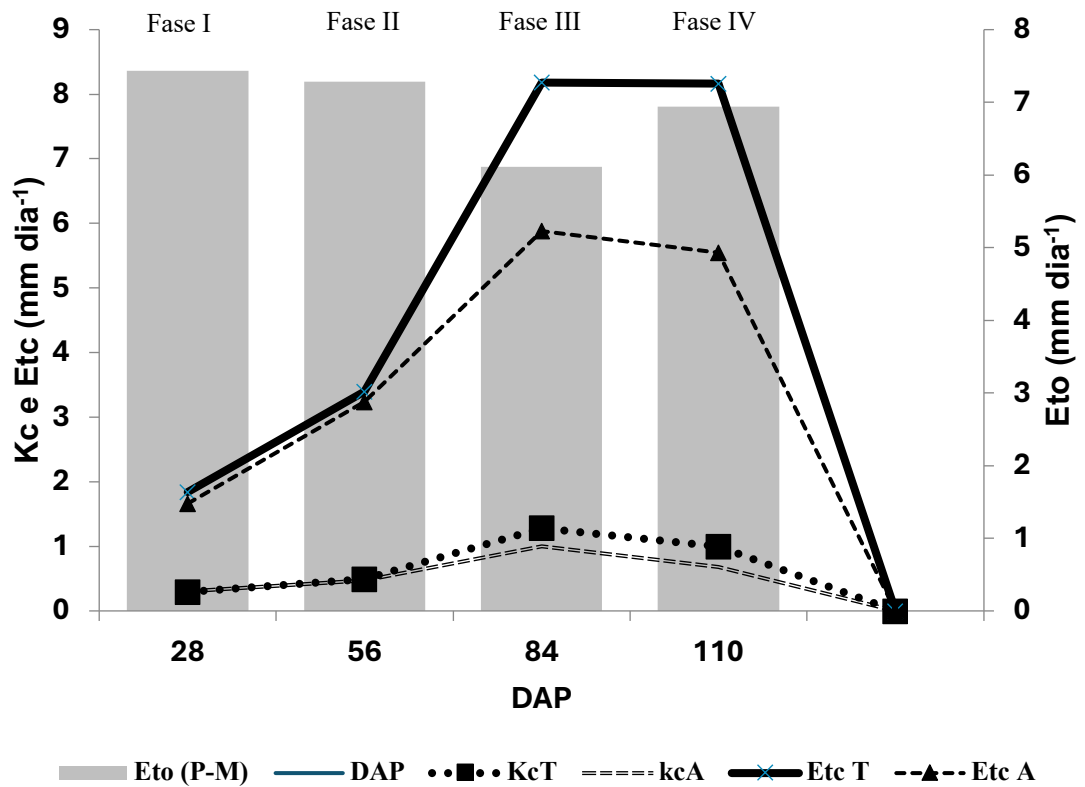
Para essas condições climáticas, a ETo acumulada foi de 389 mm durante o período experimental, com variação diária entre 6,11 e 7,43 mm dias⁻¹ e média de 5,80 mm dias⁻¹. A ETo nas fases I e II foi bastante semelhante para as duas cultivares testadas, com média, respectivamente, de 7,43 e 7,28 mm dias⁻¹, o valor máximo para ETo foi próximo a 7,43 mm dias⁻¹, ocorrendo no início do ciclo.

No presente estudo a evapotranspiração de referência (ET_o) média foi de 6,04 mm dia⁻¹. Os valores de ET_c e K_c por fase para as cultivares avaliadas para BRS Aleppo foram inferiores, com ET_c total de 310,08 mm, já os valores encontrados para o cultivar BRS Toro foram maiores com ET_c total: 410,4 mm, na Figura 2, esse comportamento pode ser explicado pelo hábito de crescimento indeterminado da variedade BRS Toro.

A ET_o seguiu uma tendência de redução das fases I para III, com aumento durante a fase 4, acompanhando o valor da radiação solar e temperatura (Tabela 1). Na fase III, a ET_o média variou de 6,11 a 6,94 mm dias⁻¹, destacando que a cultivar BRS Aleppo teve uma menor ET_c e K_c que a cultivar BRS Toro fase III e IV, (figura 2). Os valores médios da evapotranspiração de referência (ET_o) da água do solo e evapotranspiração da cultura (ET_c) no interior da casa de vegetação são apresentados na Figura 2.

As cultivares de grão-de-bico apresentam hábitos de crescimento diferentes. O hábito de crescimento indeterminado, por exemplo, leva a planta a continuar seu crescimento vegetativo após o início da floração. A cultivar BRS Toro apresentou esse padrão, que manteve o valor de K_c no máximo (fase III) até o final do experimento. Nesse hábito de crescimento, a emissão foliar é mantida e não há redução nos processos fisiológicos, no potencial hídrico foliar e na condutância estomática, garantindo uma concentração interna ideal de CO₂ para manter a transpiração e evitar a senescência foliar (Bartlett et al. 2016; Wang et al. 2020). É possível observar esse padrão no desenvolvimento da BRS Toro nas inclinações das curvas de regressão (Figura 2). O padrão produtivo do cultivar Aleppo apresentou valor de K_c menor durante a fase III em comparação o cultivar Toro, que manteve a produção próximo ao valor máximo observado no final do ciclo (Figura 2).

Figura 3 – Curva média de Kc e E_{Tc} e E_{To} das cultivares de grão de bico Toro e Aleppo de acordo com as fases de desenvolvimento da cultura estimados pelos métodos de Penman-Monteith (KcPM)



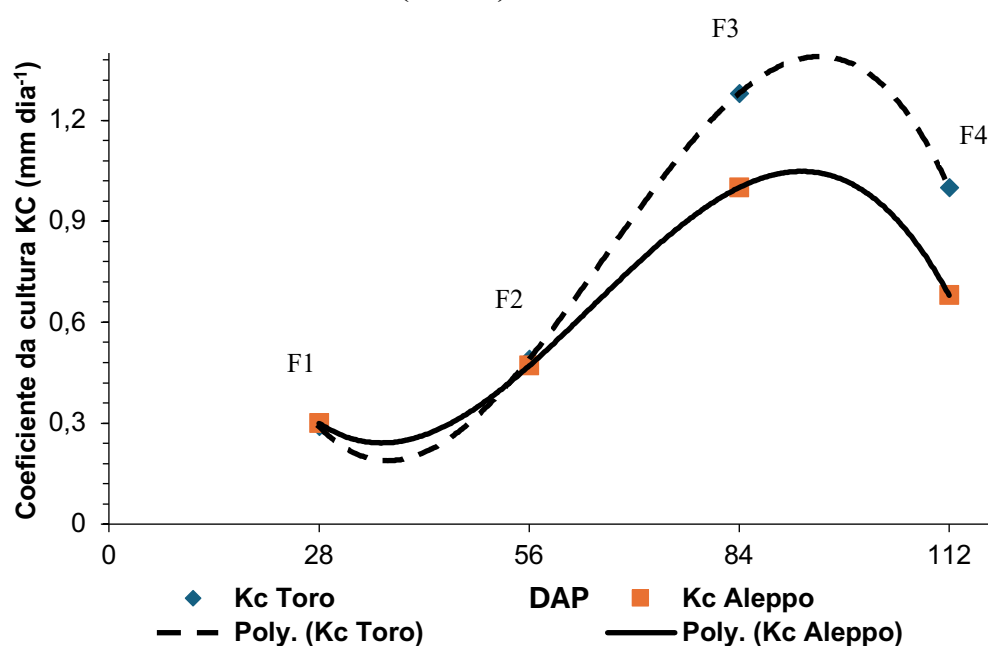
Por se tratar de evaporação em ambiente protegido a demanda atmosférica é reduzida diminuindo assim a taxa de evaporação do solo, isto se deve ao fato de que a velocidade do vento, a umidade do ar, a temperatura do ar e a radiação solar incidente serem maiores fora da casa de vegetação do que no interior da mesma (Vasquez, et al., 2005).

Em termos médios, durante todo ciclo do grão de bico e sua necessidade hídrica, dependendo da variedade e das condições edafoclimáticas locais, podem ultrapassar os 389 mm, Cunha (2001), porém, nesse estudo, ficou comprovado que cada cultivar responde conforme suas características fisiológicas e hábito de crescimento.

Os valores do coeficiente de cultura (K_c), na Figura 3, foram determinados em função das fases fenológicas do grão-de-bico, conforme a metodologia proposta por Doorenbos e Pruitt (1977). O ciclo foi dividido em quatro fases e a duração de cada fase foi determinada por observação visual, e ajustadas para representar os valores de K_c ao longo do ciclo. A figura 3, mostra os valores médios de K_c para as variedades Toro e Aleppo, referentes aos períodos de avaliação dos lisímetros durante as fases fenológicas da cultura do grão de bico.

Nascimento et al. (2016) recomendam uma lâmina total de 400 mm para o grão-de-bico em condições brasileiras. No entanto, a cultivar BRS Aleppo recebeu 310,08 mm, valor inferior, enquanto a BRS Toro recebeu 410,04 mm, acima do recomendado. Segundo Contreras et al. (2017), o microclima e o manejo em estufa podem aumentar a demanda hídrica em comparação ao cultivo a campo.

Figura 4 – Curva de K_c de duas cultivar de grão de bico Toro e estimados pelos métodos da ETo de Penman-Monteith (K_{cPM})



A Figura 3 apresenta a variação do coeficiente de cultura (K_c) das cultivares de grão-de-bico BRS Toro e Aleppo, ajustadas por modelos polinomiais de segunda ordem, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,95. Esses elevados valores de ajuste indicam que os modelos descrevem adequadamente a relação entre o K_c e os dias após o plantio (DAP), capturando as principais tendências fisiológicas de ambas as cultivares ao longo do ciclo.

O comportamento do K_c seguiu o padrão típico de culturas anuais (Doorenbos & Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), caracterizado por quatro fases fenológicas distintas (F1 a F4). Na fase inicial (F1), os valores de K_c foram reduzidos ($\approx 0,4$), refletindo a pequena área foliar e a evapotranspiração limitada do solo parcialmente exposto.

Durante o desenvolvimento vegetativo (F2), os valores aumentaram progressivamente, atingindo cerca de 0,7, em resposta ao crescimento da biomassa e à expansão foliar. A cultivar Toro apresentou leve antecipação nesse incremento, sugerindo maior eficiência fotossintética e capacidade de cobertura do solo.

O pico de K_c ocorreu na fase reprodutiva (F3), com valores próximos de 1,2 para a cultivar Toro e de 1,0 para Aleppo. Esse aumento reflete a maior demanda hídrica do dossel plenamente desenvolvido, associada à elevação da condutância estomática e à expansão máxima da área foliar (Singh et al., 2016). A diferença observada entre as cultivares indica maior vigor vegetativo e potencial transpiratório da Toro, coerente com seu porte mais ereto e maior índice de área foliar.

Na fase final (F4), ambos os genótipos apresentaram declínio acentuado do K_c , atingindo valores próximos de 0,6, o que se deve à senescência foliar e à redução da atividade fisiológica. A queda mais rápida observada em Toro sugere maturação ligeiramente mais precoce ou maior sensibilidade à limitação hídrica no enchimento de grãos.

Os resultados evidenciam que o comportamento do K_c está intimamente relacionado à dinâmica fenológica e à arquitetura da planta, variando entre cultivares em função de suas características morfofisiológicas. As diferenças entre Toro e Aleppo, embora sutis, podem implicar ajustes diferenciados no manejo da irrigação. Assim, o uso de valores de K_c específicos por cultivar pode aprimorar a estimativa da evapotranspiração e o manejo racional da água em sistemas de produção de grão-de-bico.

O coeficiente de cultura K_c (Figura 3), que é a relação entre a ET_c e a ET_o , expôs valores distintos nas quatro fases: Na fase vegetativa, o K_c apresentou valor de 0,29 e 0,3 para as cultivares Toro e Aleppo, respectivamente, sendo o valor mais baixo dentre as fases de desenvolvimento da planta, influenciado diretamente pelo alto consumo de água na frutificação. A água é mais requerida, uma vez que nessa fase há o enchimento das vagens, exigindo, assim, um maior consumo de água pelo grão de bico, que teve um K_c igual a 1,28 e 1 para as cultivares Toro e Aleppo, respectivamente. Ao final do ciclo, durante a maturação, houve uma queda do K_c , que apresentou um média de 1 e 0,68 para as cultivares Toro e Aleppo, respectivamente, ocorrendo, nesta fase, a senescência das folhas. A evapotranspiração de referência e da cultura segue o comportamento conforme (Figura 4).

A análise das curvas de coeficiente de cultura (K_c) revelou diferenças sutis, porém, consistentes, entre as cultivares de grão-de-bico BRS Toro e Aleppo. Ambas seguiram o padrão fisiológico típico de culturas anuais, com aumento gradual do K_c até o estágio reprodutivo e redução acentuada na fase final do ciclo.

A cultivar Toro apresentou valores máximos de K_c ligeiramente superiores, indicando maior demanda hídrica e vigor vegetativo, características desejáveis em condições de adequada disponibilidade de água no solo. Já a Aleppo mostrou comportamento mais estável, com menor variação do K_c ao longo do ciclo, o que pode representar vantagem sob condições de estresse hídrico.

Esses resultados reforçam a importância de se adotar coeficientes de cultura específicos para cada genótipo, uma vez que pequenas variações no K_c podem resultar em diferenças significativas na estimativa da evapotranspiração e no manejo da irrigação. Assim, o uso de curvas de K_c ajustadas por cultivar contribui para aprimorar a eficiência do uso da água e a sustentabilidade dos sistemas de produção de grão-de-bico em ambientes semiáridos.

A cultivar BRS Toro, com hábito indeterminado, manteve o ET_c máximo até o fim do ciclo, sem queda nos processos fisiológicos (Bartlett et al., 2016; Wang et al., 2020). Já a BRS Aleppo apresentou redução do K_c na fase final (Figura 4). Pendergast et al. (2019) indicam ciclos de 96 a 107 dias para grão-de-bico irrigado na Austrália. Por sua vez, Artiaga et al. (2015) relatam 115 a 120 dias em sequeiro no Cerrado.

Neste estudo, as BRS Toro e BRS Aleppo completaram o ciclo em 110 dias, inferior aos 114 dias registrados por Avelar et al. (2018). A BRS Toro apresentou maiores ET_c e K_c , indicando maior demanda hídrica. Já a BRS Aleppo teve ET_c e demanda menores. A irrigação foi suspensa aos 92 DAS. Os valores do K_c da cultura, obtidos neste trabalho, são diferentes dos valores de K_c obtidos pelo balanço hídrico do solo recomendados pela FAO (Doorenbos; Pruitt, 1977; Allen et al., 1998), o que reforça a necessidade de ser calculado por região e por cultivar. Alguns resultados apresentados no trabalho foram similares na vegetativa e na floração. Porém, deve-se ter o cuidado de calcular o K_c específico para cada cultura e região, pois, em trabalhos com cana-de-açúcar, Silva et al. (2013) relatam variações de até 40%. Em leguminosas, os valores da FAO subestimam a evapotranspiração em até 36%, podendo causar perdas de produtividade de até 12% (WEI et al., 2015).

Evapotranspiração da cultura (ETc) e evapotranspiração de referência (ETo)

A Figura 4 apresenta a variação da evapotranspiração da cultura (ETc) das cultivares de grão-de-bico BRS Toro e Aleppo, bem como a evapotranspiração de referência (ETo) ao longo do ciclo, estimadas pelo método de Penman-Monteith. A ETc foi obtida a partir do produto entre o coeficiente de cultura (Kc) e a ETo diária correspondente, refletindo a demanda hídrica real das plantas em cada fase fenológica.

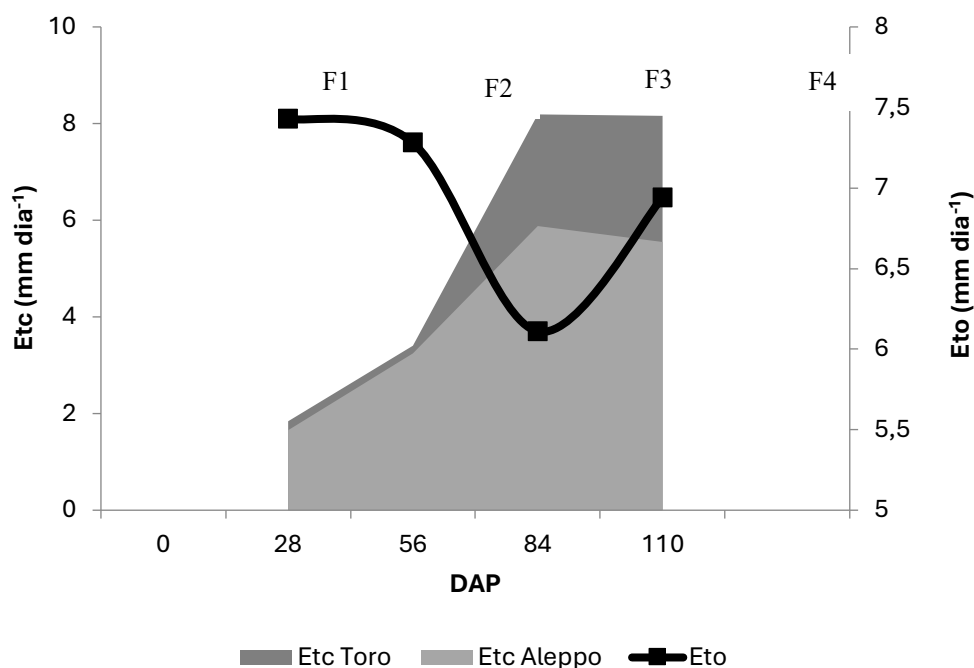
Durante a fase inicial (F1), a ETc apresentou valores médios de 2,0 a 2,5 mm dia⁻¹, acompanhando a baixa cobertura do solo e a reduzida área foliar, enquanto a ETo manteve-se em torno de 7,5 mm dia⁻¹. Essa discrepância entre ETo e ETc é típica de estádios iniciais, quando a evaporação do solo predomina sobre a transpiração da planta (Allen et al., 1998).

Na fase de crescimento vegetativo (F2), observou-se aumento gradual da ETc em ambas as cultivares, com valores próximos a 7,0 mm dia⁻¹, acompanhando o incremento do Kc e o aumento da interceptação da radiação solar. A cultivar Toro apresentou ligeiro aumento da ETc em relação à Aleppo, sugerindo maior taxa transpiratória e maior área foliar efetiva.

Durante o período reprodutivo (F3), a ETc apresentou queda expressiva, atingindo valores mínimos em torno de 4,0 mm dia⁻¹, mesmo com a ETo ainda elevada. Essa redução pode estar associada à ocorrência de déficit hídrico e ao fechamento parcial dos estômatos, o que reduz a transpiração e a absorção de água. Tal comportamento é comum em genótipos que priorizam a manutenção do potencial hídrico foliar sob condições de estresse moderado.

Na fase final (F4), observou-se novo aumento da ETc, especialmente, na cultivar Toro, atingindo valores próximos de 6,5 mm dia⁻¹. Esse incremento indica retomada parcial da atividade fisiológica, possivelmente associada ao enchimento de grãos e à recuperação hídrica do solo. A Aleppo apresentou valores ligeiramente inferiores, coerentes com seu comportamento mais conservativo em relação à perda de água.

Figura 5 – Curva de ETc e ETo “BRS” Toro e Aleppo de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura estimados pelo método Penman-Monteith (KcPM)



De forma geral, as curvas mostram que a ETo manteve variação relativamente estável ao longo do ciclo, enquanto a ETc variou conforme o desenvolvimento da cultura e a resposta fisiológica de cada cultivar. Essa diferença reflete a interação entre fatores meteorológicos e características genéticas, confirmando a necessidade de calibrar os parâmetros de manejo hídrico de acordo com o genótipo e as condições locais de cultivo.

Os resultados indicam que a evapotranspiração da cultura (ETc) acompanhou, de forma dinâmica, as fases fenológicas do grão-de-bico, sendo fortemente influenciada pela variação do coeficiente de cultura (Kc) e pela disponibilidade hídrica. A cultivar BRS Toro apresentou maior amplitude de ETc, o que sugere maior plasticidade fisiológica e maior demanda evaporativa em condições de boa disponibilidade de água.

A cultivar Aleppo mostrou comportamento mais estável, com menores oscilações ao longo do ciclo, característica desejável para regiões com restrição hídrica. A estabilidade da ETo indica que as variações na ETc são primariamente atribuídas às diferenças de Kc e ao desenvolvimento do dossel.

Essas observações reforçam a importância de considerar o comportamento específico de cada cultivar na determinação da lâmina de irrigação e na modelagem da evapotranspiração, de modo a otimizar o uso da água e maximizar a eficiência produtiva do grão-de-bico em ambientes semiáridos.

A Tabela 2 apresenta os valores médios e acumulados da evapotranspiração da cultura do grão de bico durante suas fases de desenvolvimento vegetativo até 92 dias após o transplante onde ocorreu o corte da reposição de água nos lisímetros. Os valores iniciais da ETc estão em função da evaporação do solo em virtude da pouca cobertura vegetal. Dessa forma, é muito dependente da frequência de irrigação, da demanda evaporativa da atmosfera e do tipo do solo.

A Tabela 3 apresenta a evapotranspiração média acumulada (ETc) nas diferentes fases de desenvolvimento vegetativo do grão-de-bico, para as cultivares BRS Toro e BRS Aleppo. Observa-se que a ETc aumenta do início da germinação até a fase de floração e produção, atingindo um valor médio de 3,56 mm/dia aos 84 DAP. Este incremento reflete a maior demanda hídrica da planta durante o desenvolvimento vegetativo ativo e a frutificação.

Após a floração, durante a fase de maturidade fisiológica, a ETc apresenta uma leve redução para 3,15 mm/dia aos 110 DAP. Essa diminuição está associada à senescência foliar e à redução da atividade transpiração da planta.

O coeficiente de cultura (Kc) segue padrão semelhante, iniciando em 0,57 na germinação e atingindo 0,99 na fase de floração e produção. A redução para 0,86 na maturidade final confirma a menor demanda hídrica no fechamento do ciclo.

Os valores de Kc FAO refletem as estimativas propostas para condições similares, mostrando adequação entre o comportamento observado e os parâmetros recomendados pela FAO, especialmente nas fases iniciais e finais do ciclo.

Em resumo, os resultados evidenciam que o grão-de-bico apresenta maior necessidade hídrica durante a floração e frutificação, enquanto as fases iniciais e finais demandam menor fornecimento de água, informação crucial para manejo irrigativo eficiente.

Tabela 2: (ETc) média acumulada nas fases de desenvolvimento vegetativo de duas variedades de grão de bico.

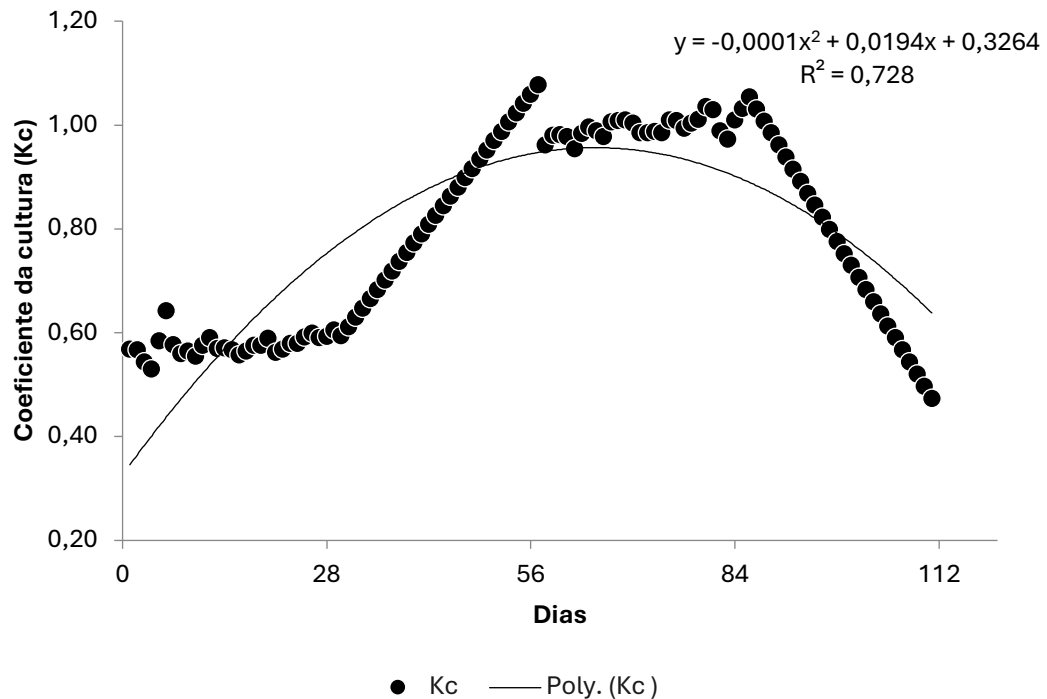
Variedades BRS Toro; BRS Aleppo					
	DAP	ETc	ETo	Kc	KcFAO
(fase geminação)	28	2,43	4,26	0,57	----
(fase vegetativa) Kc inicial	56	3,06	3,74	0,82	0,4
(fase floração e produção) Kc médio	84	3,56	3,71	0,99	1,15
(fase maturidade Fisiológica) (Kc final)	110	3,15	3,71	0,86	0,35

Os valores de Kc e da evapotranspiração da cultura (ETc) foram comparados com os valores de referência da FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). Os resultados mostraram diferenças com os valores padrão da FAO na fase inicial (Fase I: 0,57), para Kc estimado, enquanto a (FAO) subestima o Kc nesse estágio conhecer o Kc na fase inicial e

importante, pois permite fornecer para cultura nutrição adequada e necessária para início do desenvolvimento. Na fase II, o valor de Kc calculado foi o dobro do valor estimado pela FAO, pois, nessa fase, a demanda de água pela cultura aumenta seu metabolismo acelera e fase de crescimento vegetativo formação de raízes e percebe-se uma diferença de 100% correlação aos parâmetros indicados pela FAO, na fase III os valores de Kc indicado pela FAO supera em, aproximadamente, 15% o Kc calculado, mais uma vez demonstrando a necessidade de cálculo do Kc por cultura e por região. Já nas fases finais, observou-se maior divergência, com Kc de 0,86 na fase IV, o qual foi superior ao valor padrão FAO de 0,35 em aproximadamente 116%. Esses resultados indicam a necessidade de se determinar valores regionais de Kc para maior precisão no manejo hídrico. A Figura 5 apresenta a curva de Kc para o grão-de-bico, conforme os métodos analisados nas diferentes fases fenológicas. Os valores foram inferiores na fase I, aumentaram na fase II e estabilizaram na fase III, até os 92 dias, quando se iniciou o decréscimo, marcando o início da senescência e morte das raízes na fase IV.

Estudos com outras culturas confirmam esse comportamento. Lira et al. (2014) observaram valores mínimos de Kc de 0,26 nos primeiros dias após o transplante da alface, aumentando até 0,79. Nunes et al. (2009) relataram Kc superiores a 1,0 na fase final da alface 'Verônica'. Oliveira et al. (2013) constataram que, na cebola, o maior consumo de água ocorreu durante o máximo desenvolvimento vegetativo, padrão semelhante ao observado para o grão-de-bico, cuja maior demanda hídrica se deu na Fase III, correspondente ao florescimento e enchimento de grãos.

Figura 6 – Valores médios de Kc estimado para duas variedades de grão de bico BRS Toro e BRS Aleppo produzidas em cultivo protegido no Norte de Minas Gerais



Os valores médios de Kc observados na Figura 5 para as variedades BRS Toro e BRS Aleppo seguem uma tendência compatível com o ciclo fenológico do grão-de-bico em cultivo protegido. Estudos como o de Doorenbos & Pruitt (1977) indicam que o Kc varia conforme o estágio de desenvolvimento da cultura, sendo mais baixo na fase inicial e atingindo o pico durante o crescimento máximo do dossel.

Comparando com dados obtidos em campo aberto, como os relatados por Silva et al. (2021) para grão-de-bico em condições semiáridas, nota-se que os valores de Kc em cultivo protegido tendem a ser ligeiramente inferiores, possivelmente devido à menor evapotranspiração causada pela redução da radiação solar direta e pelo controle microclimático.

A equação polinomial ajustada ($R^2 = 0.728$) mostra boa capacidade preditiva, embora o valor de R^2 indique que cerca de 27% da variação nos dados não é explicada pelo modelo. Isso pode refletir variações entre as duas cultivares ou flutuações ambientais dentro do cultivo protegido, como umidade relativa ou ventilação.

Esses resultados reforçam a importância de calibrar o manejo da irrigação com base em dados locais e específicos da variedade. O uso de coeficientes médios pode ser útil para planejamento, mas o monitoramento contínuo é essencial para otimizar o uso da água, especialmente em regiões com escassez hídrica como o Norte de Minas Gerais.

CONCLUSÃO

As demandas hídricas do grão-de-bico variaram de acordo com o crescimento da cultura, fenologia e clima ao longo da estação de crescimento. Isso interfere na evapotranspiração de referência e na dinâmica do ciclo das cultivares em estudo, incluindo o seu desenvolvimento produtivo ao longo do ciclo. A evapotranspiração potencial da cultura variou entre as duas cultivares de grão-de-bico em condições de casa de vegetação. Os coeficientes de cultura (K_c) obtidos para as cultivares BRS Toro apresentaram os valores de K_c de 0,29, 0,49, 1,28 e 1,0, enquanto para a BRS Aleppo, registraram-se 0,30, 0,47, 1,0 e 0,68.

A cultivar BRS Toro exibiu os maiores valores de K_c , resultando em uma demanda hídrica total (evapotranspiração da cultura - ET_c) acumulada de 410,4 mm. Em contrapartida, a cultivar BRS Aleppo demonstrou os menores valores de K_c e, conseqüentemente, a menor demanda hídrica, com uma ET_c acumulada de 310,08 mm.

A dinâmica temporal do K_c mostrou uma correlação positiva com os padrões fenológicos de cada cultivar. Este resultado evidencia a importância da determinação específica do K_c por cultivar para otimizar a eficiência do manejo da irrigação, em detrimento da adoção de valores generalizados.

REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. *Lysimeters*. Rome: FAO, Irrigation and Drainage Paper, n. 39, 1982.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (Eds.). *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ANAPALLI, S. S.; FISHER, D. K.; REDDY, K. N.; RAJAN, N.; PINNAMANENI, S. R. Modeling evapotranspiration for irrigation water management in a humid climate. *Agricultural Water Management*, v. 225, 105731, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105731>.

ARTIAGA, O. P.; SPEHAR, C. R.; BOITEUX, L. S.; NASCIMENTO, W. M. Evaluation of chickpea genotypes in rainfed cultivation under Cerrado conditions. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)*, v. 10, p. 102–109, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i1a5129>.

AVELAR, R. I. S.; COSTA, C. A.; BRANDÃO JÚNIOR, D. S.; PARAÍSO, H. A.; NASCIMENTO, W. M. Production and quality of chickpea seeds in different sowing and harvest periods. *Journal of Seed Science*, v. 40, n. 2, p. 146–155, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v40n2185719>.

BARTLETT, M. K.; KLEIN, T.; JANSEN, S.; CHOAT, B.; SACK, L. The correlations and sequence of plant stomatal, hydraulic, and wilting responses to drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, p. 13098–13103, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1604088113>.

CONTRERAS, J. I.; ALONSO, F.; CÁNOVAS, G.; BAEZA, R. Irrigation management of greenhouse zucchini with different soil matric potential level: agronomic and environmental effects. *Agricultural Water Management*, v. 183, p. 26–34, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.025>.

CUNHA, A. R. Parâmetros agrometeorológicos de cultura de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em ambientes protegido e campo. Tese (Doutorado) – UNESP, Botucatu, 2001.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Yield response to water*. Rome: FAO, 1979.

HILLEL, D. *Soil and water – Physical principles and processes*. New York: Academic Press, 1971.

JUSTINO, L. F.; ALVES JÚNIOR, J.; BATTISTI, R.; HEINEMANN, A. B.; LEITE, C. V.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Assessment of economic returns by using a central pivot system to irrigate common beans during the rainfed season in Central Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 224, 105749, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105749>.

MOHAMMED, A.; TANA, T.; SINGH, P.; MOLLA, A.; SEID, A. Identifying best crop management practices for chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Northeastern Ethiopia under climate change condition. *Agricultural Water Management*, v. 194, p. 68–77, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.022>.

NASCIMENTO, W. M.; SILVA, P. P.; ARTIAGA, O. P.; SUINAGA, F. A. Grão-de-bico. In: *Hortaliças Leguminosas*. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2016. p. 89–118.

NUNES, A. L.; BISPO, N. B.; HERNANDEZ, R.; NAVARINI, L. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da alface para a região Sudoeste do Paraná. *Scientia Agricola*, v. 10, n. 5, p. 397-402, 2009.

OLIVEIRA, G. M. de et al. Coeficiente de cultura e produtividade da cebola submetida a diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 9, p. 969–974, 2013.

PENDERGAST, L.; BHATTARAI, S. P.; MIDMORE, D. J. Evaluation of aerated subsurface drip irrigation on yield, dry weight partitioning and water use efficiency of a broad-acre chickpea (*Cicer arietinum* L.) in a Vertosol. *Agricultural Water Management*, v. 217, p. 38–46, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.022>.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997.

SILVA, L. C. V.; SOUZA, G. S.; BRAULIO, C. S.; SANTOS, A. R.; SANTOS, J. S.; OLIVEIRA, A. S.; OLIVEIRA, E. C.; FIUZA JÚNIOR, F. J. S. Características comerciais em variedades de salsa cultivadas sob diferentes ambientes de luz. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 55705–5713, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-388>.

SILVA, V. P. R.; SILVA, B.; ALBUQUERQUE, W. G.; BORGES, C. J. R.; SOUSA, I. F.; DANTAS NETO, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 128, p. 102–109, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.06.007>.

SMITH, M. *Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. Rome: FAO, 1991.

SINGH, P.; VIRMANI, S. M. Evapotranspiration and yield of irrigated chickpea. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 52, p. 333–345, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90090-S](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90090-S).

TALEBNEJAD, R.; SEPASKHAH, A. R. Effect of deficit irrigation and different saline groundwater depths on yield and water productivity of quinoa. *Agricultural Water Management*, v. 159, p. 225–238, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.005>..

VÁSQUEZ, M. A. et al. Efeito do ambiente protegido cultivado com melão sobre os elementos meteorológicos e sua relação com as condições externas. *Engenharia Agrícola*, v. 25, p. 137-143, 2005.

WANG, Y.; CAI, H.; YU, L.; PENG, X.; XU, J.; WANG, X. Evapotranspiration partitioning and crop coefficient of maize in dry semi-humid climate regime. *Agricultural Water Management*, v. 236, 106164, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106164>..

WEI, Z.; PAREDES, P.; LIU, Y.; CHI, W. W.; PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agricultural Water Management*, v. 147, p. 43–53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.004>.

5 CAPÍTULO III

5.1 Artigo 2 - Produção de grão-de-bico sob diferentes níveis de água disponível no solo

RESUMO

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) destaca-se entre as leguminosas cultivadas mundialmente. No Brasil, seu potencial produtivo é elevado, mas há poucas informações sobre manejo hídrico e tolerância ao estresse. Este estudo avaliou a produtividade e características morfológicas de duas cultivares de grão de bico, 'BRS Aleppo' e 'BRS Toro', sob diferentes níveis de umidade no solo. O experimento, conduzido em Montes Claros, seguiu um esquema fatorial 2×4 (duas variedades \times quatro níveis de água disponível: 50%, 60%, 70% e 80%), com delineamento em blocos e três repetições. Foram analisadas características como altura de plantas, produção, índice de colheita, número de vagens, massa fresca e seca das raízes e da parte aérea e diâmetro do caule. O aumento da disponibilidade de água no solo de 50% para 80% da capacidade de campo aumentou significativamente o número e o peso das vagens das duas cultivares avaliadas, durante os estádios vegetativo e reprodutivo. No entanto, o peso das sementes por planta permaneceu constante entre os tratamentos, sugerindo que limitações fisiológicas e ambientais restringem o peso final das sementes, apesar do aumento na formação de vagens. Esses resultados ressaltam a importância do manejo preciso da água, principalmente durante as fases críticas de crescimento, e destacam a alta tolerância à seca de ambas as cultivares. A cultivar 'BRS Aleppo' demonstrou maior eficiência no uso da água e produtividade, indicando sua melhor adaptação a condições semiáridas.

Palavras-chave: *Cicer arietinum* L.; estresse hídrico; produtividade agrícola; eficiência no uso da água; 'BRS Aleppo'; 'BRS Toro'.

CHICKPEA PRODUCTION UNDER DIFFERENT LEVELS OF AVAILABLE SOIL WATER

ABSTRACT

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) stands out among legumes cultivated worldwide. In Brazil, its productive potential is high, but there is little information on water management and stress tolerance. This study evaluated the productivity and morphological characteristics of two chickpea cultivars, 'BRS Aleppo' and 'BRS Toro', under different soil moisture levels. The experiment, conducted in Montes Claros, followed a 2×4 factorial design (two varieties \times four levels of available water: 50%, 60%, 70%, and 80%), with a randomized complete block design and three replications. Characteristics such as plant height, yield, harvest index, number of pods, fresh and dry mass of roots and shoots, and stem diameter were analyzed. Increasing soil water availability from 50% to 80% of field capacity significantly increased the number and weight of pods in two chickpea cultivars, 'BRS Aleppo' and 'BRS Toro', during the vegetative and early reproductive stages. However, seed weight per plant remained constant across treatments, suggesting that physiological and environmental limitations restrict final seed weight despite increased pod formation. These results highlight the importance of precise water management, especially during critical growth phases, and emphasize the high drought tolerance of both cultivars. The 'BRS Aleppo' cultivar demonstrated greater water use efficiency and productivity, indicating its better adaptation to semi-arid conditions.

Keywords: *Cicer arietinum* L.; water stress; agricultural productivity; water use efficiency; 'BRS Aleppo'; 'BRS Toro'.

INTRODUÇÃO

O grão-de-bico é uma leguminosa de grande importância global, tradicionalmente cultivada na Índia, o país com maior produção e consumo dessa leguminosa. No Brasil, é cultivada em épocas amenas, sendo conhecida por cultivo de inverno, com destaque para sua tolerância à seca em regiões semiáridas, como o Norte de Minas Gerais.

A produtividade do grão-de-bico depende da disponibilidade hídrica e da capacidade de retenção de água no solo após as chuvas de verão. Assim como outras plantas, o grão-de-bico

é afetado por estresses ambientais e, em condições de déficit hídrico, pode ocorrer limitação em seu desenvolvimento.

Fatores climáticos, como baixo índice pluviométrico, ausência de chuvas somada ao aumento de temperatura, podem ocasionar redução da umidade do solo, o que compromete a produção e o desempenho da cultura. Por sua vez, o grão-de-bico é pouco exigente em água, com consumo hídrico de até 410 mm por ciclo, adaptando-se bem a sistemas não irrigados. Essa espécie é capaz de acessar camadas inferiores do solo (Nascimento et al., 2016; Queiroga et al., 2021), por possuir raízes profundas.

Condições de déficit hídrico podem ser definidas, como a escassez prolongada de água. Essa indisponibilidade é capaz de reduzir o desempenho da planta em todas as fases fenológicas (Bittencourt & Silva, 2018). Já o déficit hídrico surge quando a demanda da planta excede a água disponível no solo. Porém, essa condição depende da resposta fisiológica do grão-de-bico, como profundidade radicular, evapotranspiração (que, por sua vez, varia conforme a área foliar e o estágio fenológico (Blum, 2016)), além da capacidade de retenção água do solo.

Para lidar com esses desafios, as plantas ativam mecanismos adaptativos, como o fechamento estomático – essa é uma das primeiras respostas. Seguem-se ajustes morfológicos e bioquímicos, como o acúmulo de carboidratos, ativação de aquaporinas, ajuste osmótico e síntese de compostos protetores, açúcares, proteínas LEA, prolina, chaperonas térmicas e antioxidantes (Bianchi et al., 2016).

A água, que compõe até 95% da biomassa fresca, é essencial para processos, como crescimento, metabolismo, fotossíntese e regulação térmica (Brodersen et al., 2019). Durante o déficit hídrico, o fluxo de água pelo xilema é prejudicado, formando embolismos e reduzindo a condução de seiva. Essa disfunção hidráulica limita a atividade fisiológica e pode causar morte vegetal (Zipper, Qiu & Kucharik, 2016). Além disso, outros fatores abióticos como luz, temperatura, salinidade e CO₂ afetam o desenvolvimento da planta.

Estima-se que a produção agrícola global deva crescer 60% até 2050 para atender à demanda alimentar (Bourgault et al., 2020). Com isso, é essencial investir em tecnologias de cultivo e selecionar genótipos com melhor adaptação, além de conhecer as interações entre ambiente e cultivar. Portanto, avaliar genótipos sob diferentes condições hídricas permite identificar aqueles mais produtivos e resilientes (Nascimento & Silva, 2019).

Em regiões semiáridas, o cultivo irrigado a produção de grão-de-bico tem alcançado produtividades superiores a 3.000 kg ha⁻¹, que é uma produção acima da média mundial, de 800–1.200 kg ha⁻¹. Dessa forma, o manejo hídrico eficiente é essencial para alcançar grandes produtividades. Ademais, conhecer a fisiologia e a necessidade hídrica da planta também é

mister, a fim de tornar a cultura uma alternativa promissora para diversificação agrícola e sustentabilidade regional.

Neste contexto, esse estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de duas cultivares de grão-de-bico, 'BRS Aleppo' e 'BRS Toro', cultivadas em vasos, sob quatro níveis de disponibilidade hídrica no solo (50%, 60%, 70% e 80%) da capacidade de campo. Além disso, almeja-se compreender o padrão de crescimento, medir a produtividade e estimar a tolerância ao déficit hídrico, fornecendo, assim, subsídios para práticas de manejo hídrico sustentável.

MATERIAIS E MÉTODOS

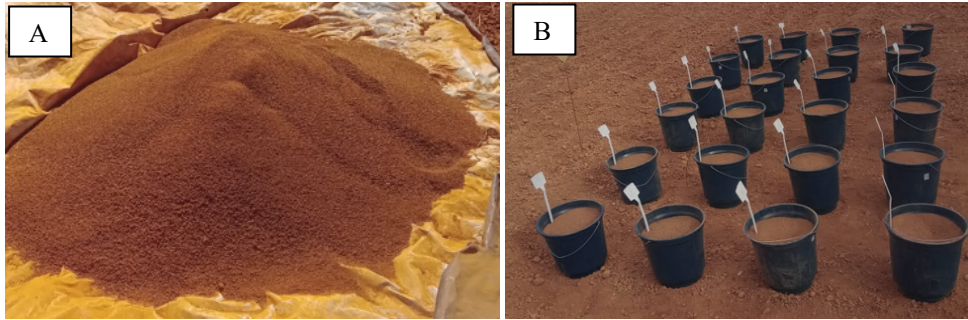
Área de estudo e condições experimentais

O estudo foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Minas Gerais, no Instituto de Ciências Agrárias, campus Montes Claros – MG, (latitude 16°43'S, longitude 43°52'W, altitude de 638 m), no período de maio a setembro de 2024. O experimento foi conduzido em vasos de plástico com capacidade de 20 litros. O clima da região, classificado como Aw segundo Köppen, é megatérmico, caracterizado por inverno seco e verão chuvoso (Alvares et al., 2013).

Caracterização química do solo

O solo da área foi classificado como Cambissolo Háptico de textura média. Dez dias antes da implantação da cultura, foram recolhidas amostras de solo na camada de 0-20 cm de profundidade para caracterização química. Os resultados são os seguintes: pH (H₂O): 6,7; P disponível (Mehlich 1, mg dm⁻³): 3,7 mg dm⁻³; P remanescente: 28,4 mg L⁻¹; K (mg dm⁻³): 245,4 mg dm⁻³; Ca²⁺: 5,9 mmol dm⁻³; Mg²⁺: 1,51 (cmolc dm⁻³); Al³⁺ (cmolc dm⁻³): 0,00 ; acidez potencial (H⁺ + Al³⁺): 1,44 mmol dm⁻³; soma de bases (SB): 8,40 mmol dm⁻³; CTC efetiva (t): 8,40 mmol dm³; saturação por alumínio (m): 0,0%; CTC em pH 7,0 (T): 9,48 mmol dm³; saturação por bases (V): 84,82%; matéria orgânica: 2,23 dag kg⁻¹; areia total: 21,30 dag kg⁻¹; silte: 39,49 dag kg⁻¹; argila: 39,49 dag kg⁻¹.

O solo foi previamente preparado e peneirado para padronização (Figura A). Cada vaso recebeu, de forma padronizada, 20 kg de solo, totalizando um conjunto solo-vaso de 20,5 kg após a padronização (Figura B).

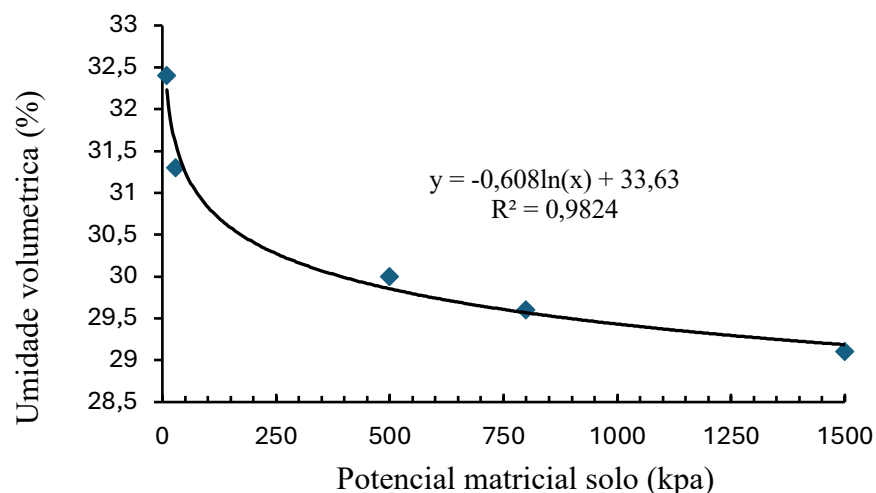


Observação: Figuras A e B: Procedimentos iniciais realizados para padronização da parcela experimental, cada vaso contem 20,5 kg de peso em massa e representa uma parcela do experimento para fins estatísticos.

Propriedades físicas do solo

O solo utilizado apresenta as seguintes propriedades físicas na profundidade de 0-20 cm, apresenta densidade de 1,72 g/cm³, na camada de 20-40 cm, a densidade é de 1,70 g/cm³, com os seguinte potencial matricial em seus diferentes níveis (0,1; 0,3; 5; 8; 15 bars), e as respectivas umidades volumétricas (%): 32,4; 31,3; 30,0; 29,6; 29,1. Esses dados foram obtidos de dados históricos da área de produção, fornecidos pelo setor de fruticultura do Instituto de Ciências Agrárias (ICA), conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: Potencial Matricial do solo em diferentes níveis, com as respectivas umidades volumétricas referentes a dados históricos do Instituto de Ciências Agrárias (ICA).

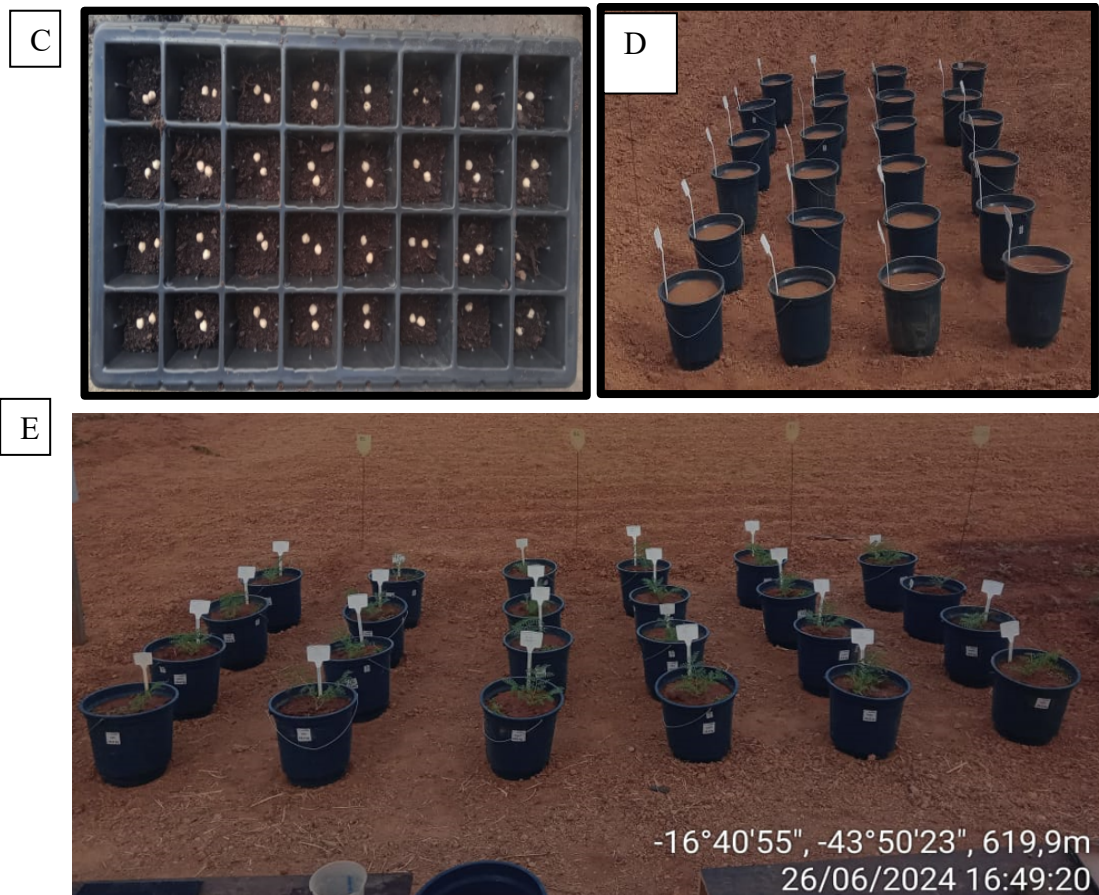


Observação: Para a execução do experimento, adotou-se a média da umidade em massa, correspondente a 30,4%, aproximadamente – 30% de umidade, como referência para os cálculos experimentais.

Condução do experimento

Foram utilizadas duas cultivares de grão-de-bico, BRS Toro e BRS Aleppo, ambas lançadas pela Embrapa hortaliças. Essas variedades são de grãos do tipo *kabuli*, apresentam crescimento semiereto e adaptabilidade ao semiárido do norte de Minas. A semeadura foi realizada manualmente, em bandejas, com o plantio ocorrido em 28 de maio de 2024, sendo utilizadas duas sementes por célula, em bandejas de polietileno, conforme demonstrado na Figura C.

A padronização dos vasos ocorreu em oito de junho de 2024, quando os vasos foram preenchidos, padronizados e identificados (Figura D). Após 14 dias do plantio, as plântulas foram transplantadas para os vasos definitivos, no dia 26 de junho de 2024, mantendo-se uma planta por vaso como segue ilustrado na Figura E.



Observação: Figuras C, D e E: Procedimento final realizado para padronização da parcela experimental, cada vaso contém uma planta e representa uma parcela do experimento para fins estatísticos.

O início do experimento ocorreu em 26 de junho de 2024. Na data de realização do transplante das mudas, cada vaso recebeu a quantidade de água correspondente à disponibilidade definida para o tratamento, as unidades experimentais receberam os seguintes tratamentos hídricos: 80% CC – 4,8 kg de água (4,8 L); 70% CC – 4,2 kg de água (4,2 L); 60% CC – 3,6 kg de água (3,6 L) e 50% CC – 3,0 kg de água (3,0 L), a determinação do volume de água presente no solo foi realizada por pesagem de cada unidade experimental, utilizando a seguinte equação:

$$VCC = m_{total} - m_{seco} / \rho_{\text{água}}$$

Onde:

- VCC – volume de água presente no vaso à capacidade de campo (CC);
- Mtotal – massa total do vaso à CC;
- Mseco – massa do vaso com solo seco;
- $\rho_{\text{água}}$ – densidade da água (1 g/cm³).

A reposição da água foi realizada da seguinte forma, por pesagem dos vasos: foi utilizada uma balança com capacidade para 150 kg, para pesar as unidades experimentais e o volume era ajustado a cada dois dias, conforme os níveis de cada tratamento, a fim de manter cada unidade experimental com a devida capacidade de campo e disponibilidade hídrica. Essa reposição da umidade do solo foi conduzida manualmente, utilizando um béquer graduado de 1 L e uma balança com capacidade para 150 kg. Os vasos eram pesados a cada dois dias para determinar a perda hídrica por evapotranspiração, permitindo a reposição da água conforme os níveis estabelecidos em cada tratamento, sempre considerando o solo com capacidade de campo conhecida de 30%.

Aos 15 dias após o transplante, em (26/06/2025), foi realizado desbaste, deixando apenas uma planta por vaso, conforme a Figura E. Durante a condução do experimento, foram realizadas: adubação inicial, que ocorreu em 20/06/2024, com 10 g de NPK (4-14-8) por vaso, correspondente a 24 dias após o plantio; adubação de emergência aos 35 dias; adubação de cobertura, sendo utilizados 3 g de sulfato de amônia e 2 g de cloreto de potássio por vaso, diluídos em água e aplicados na quantidade de 100 mL por vaso.

Durante a condução, foram realizadas várias capinas, de forma manual, nos vasos, para controle de plantas daninhas. Além disso, em 26/06/2024, aplicou-se o inseticida a base de deltametrina para prevenção de lagartas no início de formação das vagens e, aos 70 dias após o plantio, essa aplicação foi repetida de forma preventiva, a fim de evitar danos a cultura, ambas

aplicações na dose de 5 mL/10 L de água, conforme as recomendações fitossanitárias para a cultura na região (Nascimento et al., 2016). Nesse período, 83,33% das plantas apresentavam vagens formadas.

Análises estatísticas

Foram avaliadas as seguintes características: altura de plantas, número de vagens cheias totais por planta, número de vagens com um grão, número de vagens com dois ou mais grãos, produção e produtividade. Os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2020), juntamente com os pacotes ExpDes.pt, sendo que o fator qualitativo, foi feita comparação de médias pelo teste Tukey e, para o fator quantitativo, foi feita análise de regressão, sendo os coeficientes testados pelo teste t ($p \leq 0,05$).

O estudo foi delineado em blocos ao acaso com três repetições, no esquema fatorial 2 x 4. O primeiro fator correspondeu à variedade (Allepo e Toro). O segundo fator correspondeu a quatro níveis de água disponíveis no solo em cada vaso de 20l: ADS (50%%, 60%%, 70% e 80%), com três repetições. A unidade experimental foi constituída por um vaso com uma planta.

Características avaliadas

Para verificar o desenvolvimento e a produção do grão-de-bico, foram avaliadas as seguintes variáveis: Produtividade de grãos, PROD em (kg. ha^{-1}); peso total dos grãos colhidos na área útil da parcela, com umidade corrigida a 13%; Altura de plantas, ALT (cm): a partir do nível do solo, até a inserção da última folha ou vagem na haste principal; Número de dias até a floração, FLOR: data quando 50% das plantas estiverem com pelo menos uma flor aberta na área útil, considerando-se o número de dias da germinação à floração; Número de dias até a maturação, MAT: quando 90% das plantas apresentavam o teor de água nos grãos – em torno de 14%.

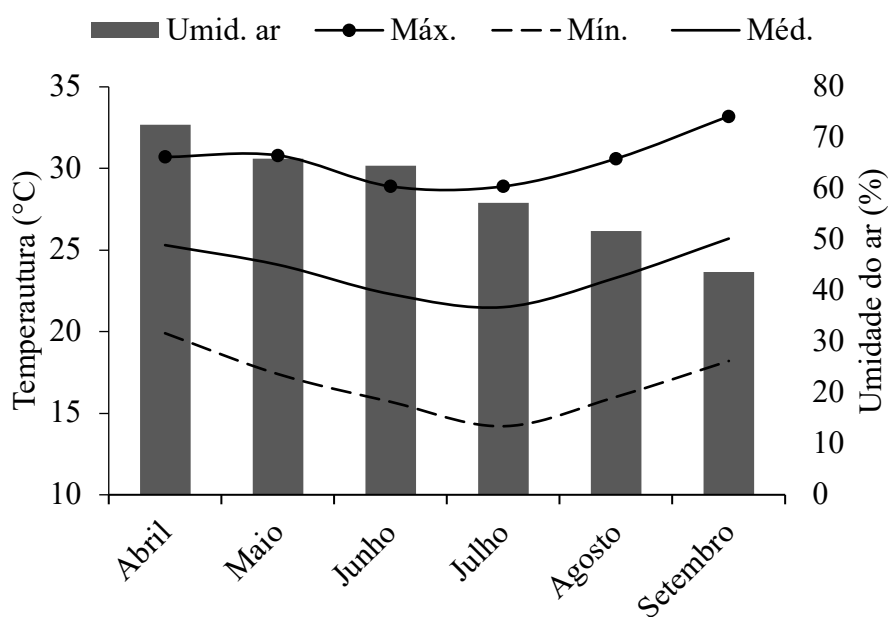
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condição climática observada entre os meses de abril e setembro de 2024 revelou que, a partir da semeadura da cultura em 25/04/2024, as médias de temperatura do ar ficaram dentro

dos valores considerados ideais para o desenvolvimento da planta. Durante esse período, a temperatura média foi de 23,6 °C. A umidade relativa do ar apresentou valores máximos de 72,6%, mínimos de 43,7% e uma média de 60,9%. Não houve precipitação durante toda a condução do experimento.

Nesse contexto, foi possível observar que as temperaturas médias permaneceram dentro do intervalo recomendado para o cultivo do grão-de-bico. A Figura 2 ilustra as condições climáticas durante o experimento. O grão-de-bico é sensível a temperaturas inferiores a 15 °C e temperaturas superiores a 30 °C. Desse modo, os extremos de temperatura podem ocasionar impacto negativo no rendimento da cultura (Kiran et al., 2019; Rani et al., 2020).

Figura 2: Dados meteorológicos de umidade relativa (%), temperaturas máxima, média e mínima (°C) durante o período de cultivo do grão-de-bico (*Cicer arietinum L.*).



Fonte: BDMEP/INMET.

Acesso em: 1 fev. 2025, às 19h. Disponível em: <https://portal.inemet.gov.br/>

Características de crescimento vegetativo (biométricos)

A Tabela 1 apresenta o resumo da análise de variância (ANOVA) para diversas características morfofisiológicas de plantas de grão-de-bico, avaliadas em função da variedade e da disponibilidade de água no solo. Os resultados indicam que o fator isolado “variedade” teve efeito estatisticamente significativo para as seguintes características: a altura das plantas

em vários estádios (30, 60 e 103 dias após a semeadura); o diâmetro do caule aos 60 dias; e a massa fresca e seca da parte aérea e das raízes, conforme evidenciado pelos valores de quadrados médios com significância ao nível de 5% e 1% pelo teste F. Isso demonstra diferenças genéticas relevantes entre as variedades para crescimento e vigor vegetativo.

A disponibilidade de água no solo, de modo isolado, influenciou, significativamente, várias características, especialmente, a altura aos 103 dias, massas frescas e secas, tanto de raízes e parte aérea, diminuindo o aumento da água disponível e favorecendo o desenvolvimento das plantas.

Quanto à interação entre variedade e água disponível no solo, foi observada significância apenas para massa seca da parte aérea (MSPA).

Nas comparações entre as variedades, as diferenças foram significativas para algumas características, indicando particularidades no comportamento das variedades (Tabela 2). A altura das plantas aos 30 dias após a semeadura (DAP) foi significativamente maior na variedade Toro (16,97 cm), em comparação com Aleppo (14,42 cm), evidenciando maior vigor inicial na variedade Toro. Essa tendência se manteve até os 103 DAP, onde a altura média da Toro foi de 50,67 cm, significamente aos 47,25 cm de Aleppo, confirmando a maior capacidade de crescimento vegetativo dessa variedade. Avelar et al. (2018) observaram uma altura média da cultivar Aleppo de até 64,7 cm em campo, bem superior ao obtido no presente trabalho conduzido em vasos. A variedade Toro, segundo informações descritivas da cultura lançada pela Embrapa, pode atingir a altura média de 70 cm. Em estudos similares, as alturas máximas de plantas de grão-de-bico cultivadas sob irrigação atingiram 77,67 cm (Komal et al., 2018), valor diferente do encontrado neste estudo.

Quanto ao efeito dos diferentes níveis de água no solo, independentemente da variedade, notou-se que, durante os primeiros estágios de desenvolvimento (30 e 60 dias), a altura das plantas apresentou pouca variação em resposta aos diferentes níveis hídricos, não se detectando efeito significativo nesta característica com a elevação dos níveis de água no solo (Figura 3).

Tabela 1 – Quadro resumo da análise de variância de dados da biomassa de plantas de grão-de-bico em função da variedade e da água disponível no solo.

FV	GL	QUADRADOS MÉDIOS									
		ALT30	ALT60	ALT90	ALT103	DC60	DC103	MFPA	MSPA	MFR	MSR
Bloco	2	3,56	11,17	2,04	70,04	4,04	38,78	254,60	1,80	304,30	135,88
Var	1	39,02*	26,04	5,04	88,49*	20,17**	65,37	345,00	192,70	3.901,50*	425,04*
ADS	3	7,72	51,37	60,26	20,26**	4,67	90,95	5.270,60*	1.454,93**	3.653,40*	231,71*
Var x ADS	3	11,67	10,49	7,82	13,04	0,61	67,23	613,37	223,67*	1.308,27	7,49
Resíduo	14	6,89	16,21	18,18	70,04	1,95	42,13	256,53	49,41	715,77	54,02
CV (%)		16,72	9,14	8,49	7,38	20,93	49,31	13,39	13,67	42,75	31,78

* e ** Significativos a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. ALT30, 60, 90 e 103=altura de plantas aos 30, 60, 90 e 103 dias após a semeadura, respectivamente; DC60 e 103=diâmetro do caule aos 60 e 103 dias, respectivamente; MFPA=massa fresca da parte aérea; MSPA=massa seca da parte aérea; MFR=massa fresca da raiz; MSR=massa seca da raiz; FL60=floração.

O diâmetro do caule aos 60 DAP foi significativamente maior na Aleppo (7,58 cm) em comparação com a Toro (5,75 cm). Aos 103 dias, embora tenha sido observado valor nominal superior também nesta variedade, não foi constatada diferença significativa. Tais resultados indicam que Aleppo pode desenvolver uma estrutura mais robusta, conferindo maior suporte para as plantas.

Não foi observada diferença estatística significativa no diâmetro do caule das plantas com o aumento dos níveis de água no solo, demonstrando ser indiferente a resposta desta característica com a variação do teor de água no solo nos níveis estudados.

A massa fresca da parte aérea não se diferenciou entre as variedades, mesmo tendo sido constatada diferença significativa na altura plantas, sendo Toro mais alta na fase final do ciclo (Tabela 2).

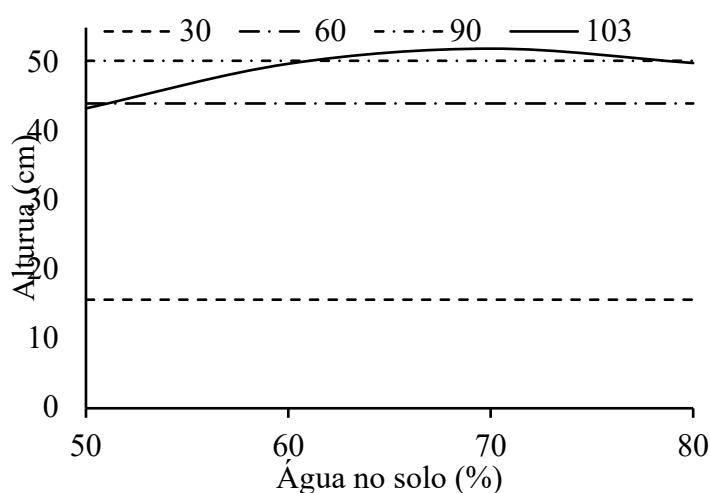
Tabela 2 – Comparação de médias e equações de regressão de fatores isolados Genótipos e Água Disponível no Solo de plantas de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.), Montes Claro-MG, 2024.

CARACTERÍSTICAS	CV (%)	FATORES ISOLADOS		
		VARIEDADES		Água Disponível no solo
		Aleppo	Toro	
Altura DAP 30 (cm)	16,72	14,42b	16,97a	$\bar{Y}=15,69$
Altura DAP 60 (cm)	9,14	43a	45,08a	$\bar{Y}=44,04$
Altura DAP 90 (cm)	8,49	49,75a	50,67a	$\bar{Y}=50,21$
Altura DAP 103 (cm)	7,38	47,25b	50,67a	$\hat{Y}=-52,79+2,99**X-0,0213*X^2$ $R^2=0,98$
Diâmetro DAP 60 (cm)	20,93	7,58a	5,75b	$\bar{Y}=6,67$
Diâmetro DAP 103(cm)	49,31	14,81a	11,51a	$\bar{Y}=13,16$
MFresca Parte aérea (g)	13,39	123,42a	115,83a	$\hat{Y}=-24,13+2,21**X$ $R^2=0,92$
MFresca Raiz (g)	42,75	75,33a	49,83b	$\hat{Y}=-44,88+1,65**X$ $R^2=0,75$
MSeca Raiz (g)	31,78	27,33a	18,91b	$\hat{Y}=-7,10+0,46**X$ $R^2=0,93$

Notas: As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. * e ** significativos a 5 e 1%, respectivamente pelo teste t.

Isso indica relativa tolerância do grão-de-bico à limitação de água no início do ciclo, possivelmente, decorrente do baixo consumo hídrico e da priorização do crescimento radicular nessas fases. No entanto, à medida que o ciclo avança, especialmente após os 90 dias, verifica-se incremento mais expressivo na altura, atingindo valores máximos próximos aos 103 dias em condições mais favoráveis de umidade do solo. Foi observado efeito quadrático na altura da planta na medida em que os níveis de água no solo aumentaram, havendo uma tendência de redução da altura na máxima disponibilidade de água no solo, conforme observado na Figura 3.

Figura 3 – Altura de plantas de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.



Nessa etapa final do desenvolvimento, a maior disponibilidade de água potencializa o crescimento em altura, indicando maior sensibilidade da planta à restrição hídrica na fase de enchimento dos grãos e alongamento final do caule, conforme relatado em estudos fisiológicos da cultura.

Considerando que a altura foi uma característica avaliada durante todo o ciclo da planta e em cada nível de água no solo para ambas as variedades, foi feita uma análise multivariada em função destes dois fatores quantitativos (Figura 4). Complementando as informações da (Figura 3), os gráficos de superfície de resposta ilustram a dinâmica do crescimento em altura das plantas de grão-de-bico em função dos dias após a semeadura (DAS) e da água disponível no solo (ADS), permitindo uma visualização tridimensional da interação desses fatores sobre o fenótipo.

Para a variedade Aleppo, a superfície mostra um aumento gradual da altura com o aumento do DAS e da ADS, atingindo um pico próximo ao centro da curva parabólica de DAS, o que reflete a influência inicial seguida de desaceleração do crescimento típico da planta, com o efeito positivo da água destacadamente significativo para manter a robustez e o desenvolvimento vegetativo. Já para a variedade Toro, a superfície indica que o crescimento em altura é fortemente dependente do DAS, mas menos sensível às variações em ADS, espelhando a não significância estatística do efeito da água observada no modelo. Essa diferença sugere adaptações fisiológicas e estratégias de uso hídrico distintas entre as variedades, que podem influenciar sua resposta a regimes de supervisão e manejo hídrico, e pode estar associada a características fisiológicas e genéticas distintas, como maior capacidade de exploração radicular ou estratégias metabólicas adaptativas, conferindo-lhe vantagens em ambientes com disponibilidade hídrica variável.

Esses resultados ressaltam a importância do manejo adequado da irrigação, sobretudo nas fases finais do ciclo, para maximizar o potencial de crescimento e rendimento do grão-de-bico. A tolerância inicial à limitação de água, típica da espécie e associada ao seu sistema radicular profundo, é um fator importante para a adaptação em ambientes sujeitos a estresses hídricos sazonais, mas o fornecimento de água é determinante nas fases reprodutivas para a plena expressão do crescimento vegetativo e da produtividade, conforme relatado por Moreira (2020).

Quando se avalia a massa fresca em função dos níveis de água no solo, observou-se efeito linear crescente, onde as médias observadas chegaram a 154,17 g com 80% de água disponível (Figura 5). Isso indica que, sob condições de maior umidade, a planta maximiza a captação de água, favorecendo processos fisiológicos como transporte de nutrientes, fotossíntese e crescimento, resultando em tecidos mais hidratados e volumosos.

Em relação à massa seca da parte aérea, como houve interação significativa entre os fatores, foi feita a comparação entre as variedades dentro de cada nível de água disponível e a regressão polinomial para cada variedade em função dos níveis de água disponível no solo. Observou-se que, de um modo geral, que foram poucas as diferenças entre as variedades Aleppo e Toro (Tabela 3). Embora a Toro tenha obtido maior altura no final do ciclo, conforme observado na Tabela 2, isso não resultou em maior acúmulo de massa seca. Essa maior altura pode ser explicada por diferenças na alocação de biomassa e na morfologia da planta.

A altura da planta está relacionada, principalmente, ao alongamento de entrenós e ao crescimento em altura dos ramos, que nem sempre se traduz diretamente em maior acumulação de massa seca total, pois pode representar uma distribuição diferente da biomassa, com maior proporção para tecidos menos densos, como caules e folhas alongadas, mas não necessariamente maior produção de matéria seca total.

Fisiologicamente, a Toro pode expressar crescimento vertical mais rápido ou maior alongamento celular, um mecanismo para competir por luz, mas isso pode implicar menor espessura ou densidade do tecido, refletindo uma massa seca semelhante à da Aleppo, que, talvez, invista mais em biomassa mais compacta e eficiente.

Além disso, a altura é influenciada por fatores genéticos que regulam o crescimento em comprimento, e a massa seca, pela capacidade fotossintética e alocação de assimilados. Assim, a Toro pode priorizar o crescimento em altura para melhor aproveitamento da luz, sem necessariamente aumentar a biomassa total acumulada, equilibrando suas estratégias para o ambiente de água disponível.

Esse padrão é comum em plantas adaptadas a ambientes onde a competição pela luz é importante, enquanto a Aleppo pode investir em uma arquitetura mais resistente e estável, importante para resistência aos estresses ambientais. Essa diferença indica estratégias adaptativas entre as variedades avaliadas em Montes Claros-MG.

Figura 4 – Altura de plantas de grão-de-bico ao longo de dias após o plantio, em função de água disponível no solo. **Significativo a 1% pelo teste t; ^{ns}= Não significativo. Transporte de nutrientes, fotossíntese e crescimento, resultando em tecidos mais hidratados e volumosos.

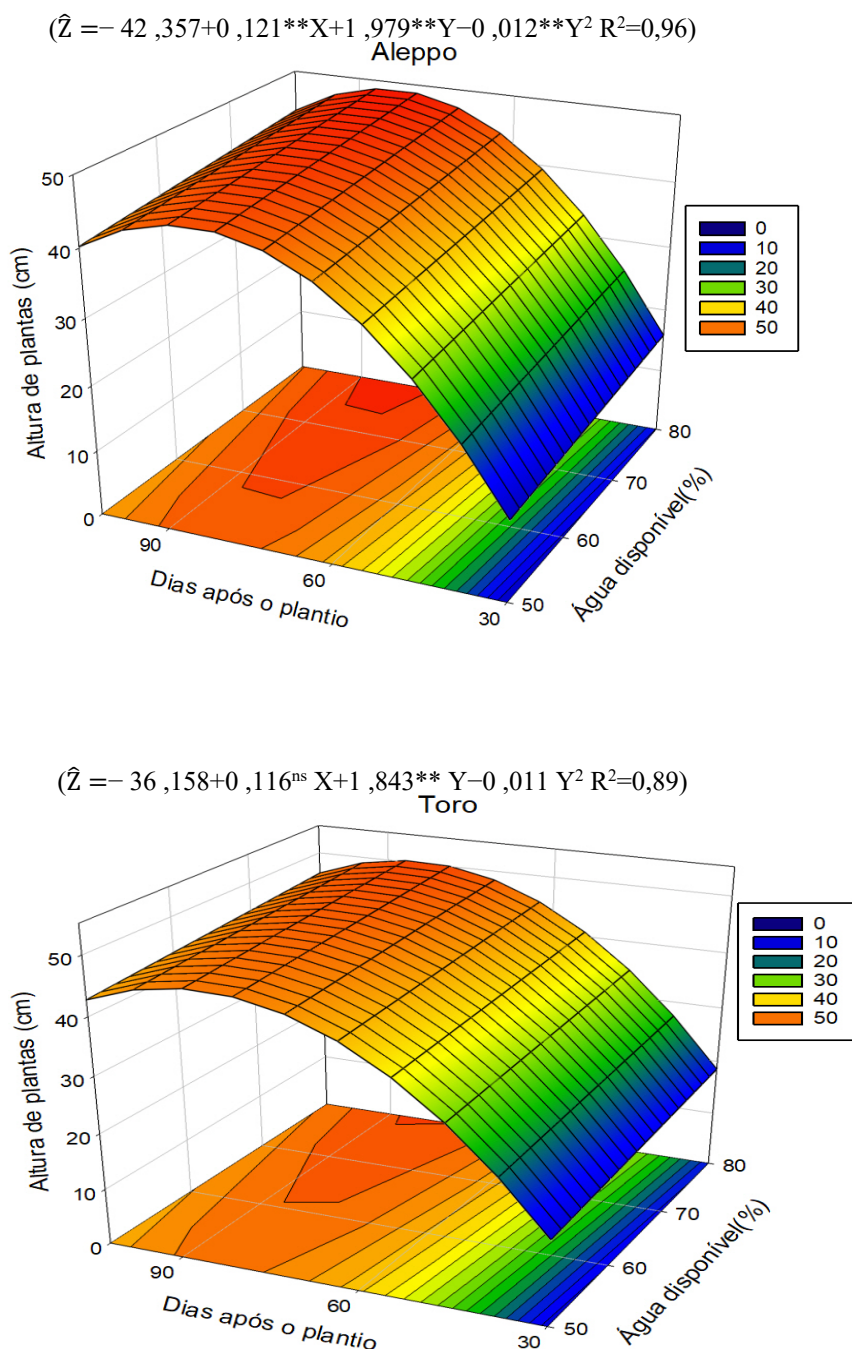
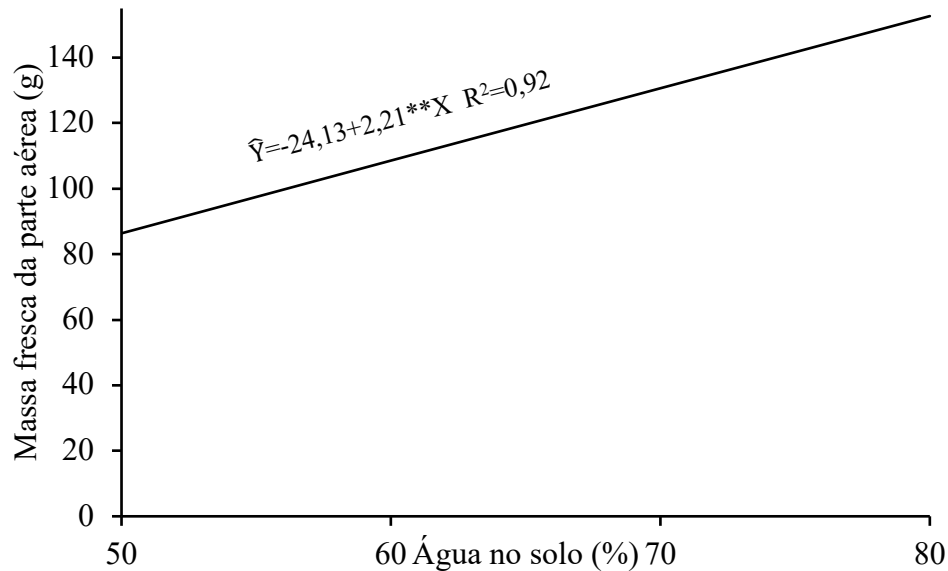


Figura 5 – Massa fresca da parte aérea de plantas de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.



Já quando se avalia a massa seca em função dos níveis de água disponível, observou-se que ambas as variedades apresentaram aumento da massa seca com maior disponibilidade de água no solo, demonstrando resposta positiva ao abastecimento hídrico. A curva da variedade Aleppo parte de valores mais altos nas menores porcentagens de água (50% e 60%), revelando melhor desempenho inicial sob condições de restrição hídrica moderada. Já a variedade Toro iniciou com menor massa seca, mas sua curva apresentou crescimento mais acentuado, ultrapassando Aleppo no maior nível de água disponível (Figura 6).

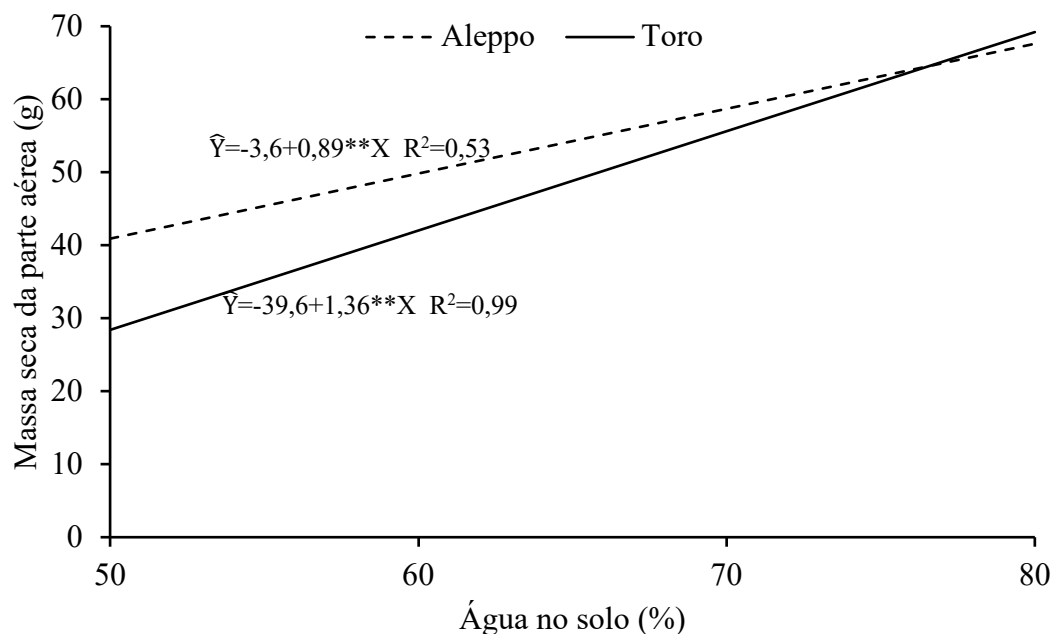
Essa diferença sugere que Aleppo apresenta maior capacidade fisiológica para manter a produção de biomassa em situações de menor disponibilidade de água, provavelmente devido a mecanismos de tolerância ao estresse hídrico.

Tabela 3 – Comparação de médias da massa seca da parte aérea de variedades de grão-de-bico, em função da água disponível no Solo, Montes Claro-MG, 2024. CV (13,67%).

Variedade	Água disponível no solo (% da Capacidade de Campo)			
	50	60	70	80
Aleppo	33,00a	65,33a	51,33a	67,33a
Toro	28,67a	42,00b	53,67a	70,00a

As médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferenciam entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 6 – Massa seca da parte aérea de duas variedades de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.



Por outro lado, a Toro demonstrou a melhor resposta ao aumento dos níveis da água, diminuindo maior potencial produtivo em condições adequadas, mas menor tolerância inicial ao déficit.

Isso implica as plantas terem capacidade de tolerar variações na disponibilidade hídrica nas fases iniciais e específicas do seu desenvolvimento, sem grandes impactos no crescimento em altura.

Essa resposta pode ser explicada pelo hábito fisiológico do grão-de-bico, que apresenta raízes profundas capazes de buscar água em camadas mais profundas do solo, o que lhe confere tolerância a períodos moderados de déficit hídrico nas fases iniciais. Já na fase final, próxima à maturação, a demanda por água aumenta para maximizar o desenvolvimento e o enchimento dos grãos, quando a deficiência hídrica impacta diretamente no crescimento da planta, refletindo em menor altura final.

O grão-de-bico é uma leguminosa adaptada a ambientes semiáridos, apresentando sistema radicular profundo que pode atingir até 45 cm de profundidade na fase reprodutiva, o que favorece a exploração de água em camadas mais profundas do solo e contribui para sua tolerância à seca (Purushothaman et al., 2017). Já nos primeiros estágios de crescimento, a planta exige menor quantidade de água, pois seu metabolismo ainda não está totalmente

desenvolvido, e a evapotranspiração da área foliar é reduzida, o que minimiza os impactos da diferença na disponibilidade hídrica.

Considerando que, para a massa fresca e seca das raízes, houve efeito isolado da variedade e da água disponível do solo. Além disso, apresentou-se comparação de médias para o fator qualitativo e regressão para o fator quantitativo. Conforme apresentado na Tabela 2, a Aleppo apresentou valor médio de 75,33 g, significativamente superior ao da Toro, com 49,83 g. Para a massa seca de raízes, o padrão se repete: a Aleppo também apresentou maior valor (27,33 g) em comparação à Toro (18,92 g) – diferenças confirmadas pelo teste estatístico de Tukey a 5%.

Esses resultados sugerem que a Aleppo investe mais em desenvolvimento e acúmulo de biomassa radicular, o que pode estar relacionado a uma estratégia fisiológica de maior exploração do solo e maior tolerância ao déficit hídrico. Isso também pode estar relacionado a uma maior massa radicular favorecendo a absorção de água e nutrientes, além de maior resiliência em ambientes variáveis quanto à disponibilidade hídrica, justificando o desempenho superior dessa variedade distribuída também em outras características.

Por outro lado, a Toro apresenta menor massa de raízes, tanto na fração fresca quanto na seca, diminuindo menor desenvolvimento radicular. Isso pode limitar sua capacidade de adaptação ao estresse hídrico e restringir seu potencial de crescimento e produtividade em situações de menor água no solo, mesmo que apresente vantagens em crescimento de parte aérea ou altura sob condições ideais.

Portanto, a Aleppo mostra maior capacidade de alocação de biomassa para as raízes, diminuindo ser uma variedade mais adaptada a solos de disponibilidade hídrica variável, enquanto a Toro tende a investir menos em raízes, podendo ser mais vulnerável a estresses abióticos relacionados a limitações hídricas. Em um trabalho com diferentes genótipos, Avelar et al. (2018) afirmaram que cultivares com maior massa de raiz geralmente apresentam maior biomassa total e produtividade, caso da Aleppo neste estudo. Estudos semelhantes também mostram que a alocação de biomassa radicular está correlacionada ao vigor e à tolerância hídrica, corroborando o presente resultado.

Quando se avaliou a massa das raízes como resposta aos níveis de água no solo, observou-se resposta linear crescente, tanto para massa fresca (Figura 7), quanto para massa seca (Figura 8), indicando que as plantas fornecem maior suporte para desenvolvimento radicular em solos com maior umidade. Isso ocorre porque a água favorece a expansão celular, o metabolismo e o transporte de nutrientes, otimizando o crescimento das raízes.

Em condições com menor disponibilidade de água, como 50% da capacidade de campo, a planta reduz seu crescimento radicular devido à limitação na captação de água e à necessidade de conservar recursos internos, o que impacta diretamente a capacidade de exploração do solo para aquisição de nutrientes. Com maior umidade no solo (70-80%), há maior vigor radicular, resultando em maior massa fresca e seca das raízes, favorecendo o suporte à parte aérea e a resistência ao estresse.

Estudos indicam que a fase crítica para fornecer água adequada no grão-de-bico é durante o estabelecimento e o período vegetativo, quando o sistema radicular está em desenvolvimento ativo (Moreira et al., 2020). A eficiência do uso da água está relacionada ao desenvolvimento radicular que maximiza a absorção e o uso do recurso hídrico disponível (Silva, 2011). Dessa forma, manter a supervisão ou monitorar a umidade do solo é fundamental para manter o crescimento radicular e a produtividade da cultura em regiões como Montes Claros-MG.

Figura 7 – Massa fresca da raiz de duas variedades de plantas de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.

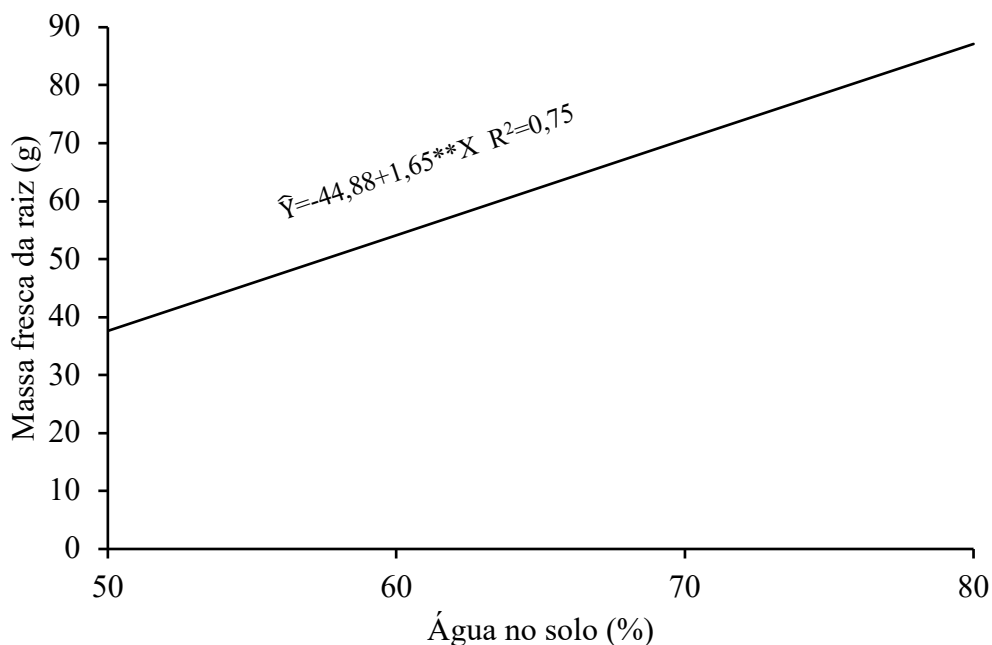
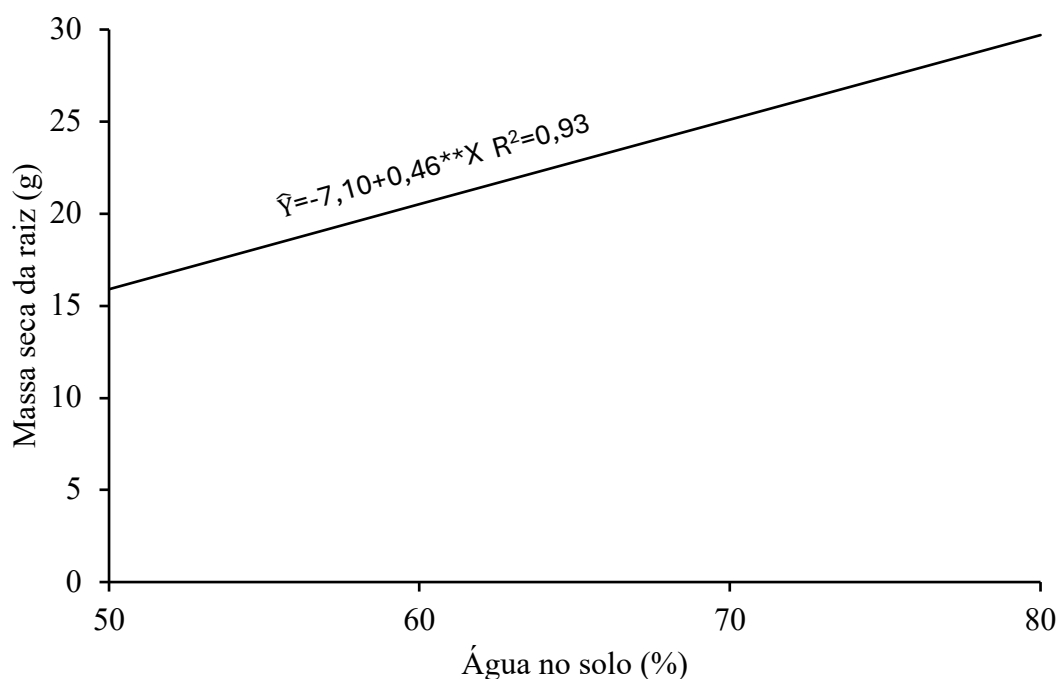


Figura 8 – Massa seca da raiz de duas variedades de plantas de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.



Características produtivas do grão-de-bico (componentes de rendimento)

Conforme apresentado na Tabela 4, a análise de variância revela efeitos significativos dos fatores isolados da variedade e da disponibilidade de água no solo para a maioria das características produtivas avaliadas. A interação entre os fatores foi significativa apenas para o número de sementes por planta (NSPP). O fator variedade influenciou o número de vagens por planta (NVPP), sem sementes (NVSSPP), com uma (NV1S) e com duas sementes (NV2S), além do número de sementes por planta (NSPP). Já a água disponível no solo influenciou NV1S, NVPP, NSPP e PVPP.

Ao se considerar o efeito dos fatores isoladamente, observou-se que, na comparação do fator qualitativo (variedades), a Aleppo foi superior em quase todas as características de contagem de vagens, exceto para o NVSSPP (Tabela 5). Cabe destacar o predomínio de vagens com uma semente em ambas as variedades, representando, em média, 75% das vagens das plantas.

O fato de a Aleppo ter se destacado em relação ao número de vagens por planta com duas sementes, a torna alvo importante em programas de melhoramento. Desse modo, o

potencial produtivo de plantas com essa característica pode ser ampliado via seleção de genótipos com maior propensão à formação de vagens com duas sementes.

Já as características produtivas de grãos (Índice de Colheita e Peso de grãos por planta) não tiveram diferenças estatísticas entre as variedades, sugerindo que ambas têm o mesmo potencial produtivo. A produção de grãos por planta variou de 25,25 g (Toro) a 29,33 g (Aleppo). Em um trabalho com a Aleppo em Januária e Montes Claros, cultivados em campos irrigados, Avelar et al. (2016) obtiveram valores de 9 a 32 g por planta, respectivamente. Ao se converter a produção de grãos obtida por planta para rendimento por ha, considerando uma população de 200.000 plantas por ha, chega-se a valores calculados de 5,05 a 5,87 toneladas por ha.

Quanto ao efeito do fator quantitativo (água disponível no solo), observou-se efeito linear crescente para todas as características onde houve efeito significativo (Figura 9). Para o NVPP com 80% de água disponível no solo, houve incremento de 50,5 para 93,8 (85,74%). Para o NV1S, houve aumento de 45,83 para 88,67 (93,48%). Para o NSPP, o número de sementes aumentou de 49,83 para 92,83 (86,32%). Para o NVSSPP e o NV2SP, não foram observados efeitos do aumento dos níveis de água no solo (Tabela 5). Esses dados indicam que a água disponível no solo nos níveis estudado teve um efeito relevante sobre o número e peso de vagens por planta em grão-de-bico, sendo essencial para maximizar a produção, especialmente, de vagens. Isso reforça a importância do manejo adequado da irrigação para melhorar o rendimento da cultura, especialmente no que tange o impacto direto no estabelecimento e no desenvolvimento de vagens, bem como no peso acumulado de produção por planta.

Ao se considerar o efeito da interação no número de sementes por planta, observou-se que, apenas no nível 80% da capacidade de campo, houve diferença entre as variedades, onde a Aleppo (127,33) produziu mais grãos do que Toro (58,33), indicando que a Aleppo foi mais produtiva (Tabela 6). Nos demais níveis de água no solo, ambas variedades tiveram número de grãos semelhantes.

Quanto ao efeito dos níveis de água no solo, para cada variedade, apenas a Aleppo respondeu ao aumento da disponibilidade de água, onde observou-se efeito linear crescente. O número de grãos aumentou de 53,66 para 127,33, representando um aumento de 137,29%. Já a Toro manteve a média de 59,25 grãos por planta, mesmo com a elevação dos níveis água no solo (Figura 9). Tal resultado indica potencial para maior produtividade de Aleppo em áreas irrigadas ou com boa disponibilidade de água no solo. Por outro lado, a Toro mostra a melhor

eficiência de uso da água e estabilidade produtiva sob diferentes níveis hídricos, tornando-se adequada para condições de restrição de água no solo.

Entretanto, para a produção de grãos por planta e para o Índice de colheita, o aumento da disponibilidade de água no solo não resultou em aumento na produção pela planta, não acompanhando o aumento das características de vagens observadas. O Índice de colheita teve efeito linear decrescente (Figura 10), enquanto a produção de grãos se manteve estável, mesmo com o aumento de níveis de água no solo.

Alguns estudos indicam que a elevação do número de vagens ou mesmo das sementes nem sempre resulta em maior fração de biomassa direcionada para os grãos, especialmente, quando ocorre aumento paralelo da biomassa vegetativa com o fornecimento adicional de água. Ou seja, a água extra pode promover o crescimento tanto reprodutivo quanto vegetativo, mantendo a proporção entre os compartimentos e, conseqüentemente, o índice de colheita estável (Long et al., 2015; Richards et al., 2020).

O fornecimento adicional de água favorece a indução floral e o estabelecimento de estruturas reprodutivas, resultando em maior quantidade de vagens e sementes formadas por planta. No entanto, durante o período de enchimento das sementes, pode ocorrer competição por assimilados, principalmente se a quantidade de matéria fotossintética produzida pelas folhas não acompanhar o aumento na demanda imposta pelo maior número de sementes. Conforme Gimenez et al. (2024), embora a maior disponibilidade hídrica favoreça a formação e manutenção de vagens, fatores como aborto reprodutivo, eficiência reduzida na divisão da biomassa para os grãos e influências ambientais múltiplas podem limitar o incremento no peso final das sementes. Dessa forma, a planta pode formar um maior número de vagens, mas a conversão desse aumento na produção de sementes mais pesadas é restrita por limitações fisiológicas e ambientais, corroborando a estabilidade observada no peso de grãos por planta. Em cultivos onde há incremento estrutural (mais vagens e grãos), pode ocorrer maior competição entre sementes individualmente, limitando seu peso final, especialmente quando outros fatores como nutrientes ou assimilados se tornam limitantes no enchimento. Avelar et al. (2016) e Moreira et al. (2020) sugerem que o grão-de-bico apresenta resposta de estabilidade no peso de grãos frente ao fornecimento hídrico, devido à priorização do desenvolvimento de mais estruturas (vagens/grãos), sem garantir acréscimo proporcional ao peso dos grãos.

A resposta negativa do índice de colheita reflete a maior biomassa reprodutiva (vagens e grãos), dado o crescimento vegetativo estimulado pelo aumento de água, em detrimento do peso dos grãos por planta. Esse comportamento é descrito em trabalhos sobre leguminosas, onde a maximização do número de órgãos reprodutivos e crescimento vegetativo pode ocorrer

em detrimento do enchimento e proporção de biomassa destinada aos grãos, afetando diretamente o índice de colheita (Bandeira et al., 2024; Gimenez et al., 2024, Hosken et al. 2017).

Tabela 4 – Análise de variância de dados das características produtivas do grão-de-bico em função da variedade e da água disponível no solo.

FV	GL	QUADRADOS MÉDIOS							
		NVSS	NVIS	NV2S	NVPP	NSPP	PVPP	PSPP	IC
Bloco	2	1,01	5,21	0,07	5,70	3,54	318,50	102,79	4,03
Var	1	0,55	14,05*	5,60**	15,75**	10,30*	266,67	37,50	18,04**
ADS	3	0,18	6,30*	0,24	6,27*	4,73*	287,22*	57,61	15,75**
Var x ADS	3	0,47	3,86	0,07	4,13	4,34*	72,33	69,17	6,99
Resíduo	14	0,43	1,61	0,28	1,29	1,40	72,26	46,17	1,64
CV (%)		37,02	15,40	32,42	13,21	14,38	22,97	25,82	20,23

* e ** Significativos a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente. NVSS=número de vagens por planta sem sementes; NVIS= número de vagens por planta com uma semente; NV2S= número de vagens por planta com duas sementes; NVPP= número de vagens por planta; NSPP=número de sementes por planta; PVPP=peso de vagens por planta; PSPP= peso de sementes por planta.

Tabela 5 – Características produtivas de duas variedades de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.), sob diferentes percentagens de água disponível no solo. Montes Claros-MG, 2025.

CARACTERÍSTICAS	FATORES ISOLADOS		
	Variedades		Água Disponível no solo (50, 60, 70 e 80%)
	Allepo	Toro	
NVPP (un.)	9,4*a (87,59)	7,78b (62,33)	$\hat{Y} = 3,8688 + 0,0726^{**}x$ R ² 0,84
NVSS (un.)	1,59a (2,42)	1,91a (3,58)	$\bar{Y} = 1,75$
NV1SP (un.)	8,99a (80,67)	7,48b (57,67)	$\hat{Y} = 3,3878 + 0,0745^{**}x$ R ² 0,88
NV2SP (un.)	2,11a (4,25)	1,14b (1,08)	$\bar{Y} = 2,67$
NSPP (un.)	9,35a (89,50)	7,62b (59,92)	$\hat{Y} = 5,1500 + 0,4900^{**}x$ R ² 0,95
PVPP (g)	40,33a	33,67a	$\hat{Y} = 5,1500 + 0,4900^{**}x$ R ² 0,84
PSPP (g)	29,33a	25,25a	$\bar{Y} = 27,29$
IC (%)	36,35a	35,18a	$\bar{Y} = 35,76$

Notas: As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste Tukey. NVPP= número de vagens por planta; NVIS= número de vagens por planta com uma semente; NV2S= número de vagens por planta com duas sementes. PVPP=peso de vagens por planta. PSPP=peso de sementes por planta. IC=Índice de Colheita. * Dados transformados por \sqrt{x} . Dados originais entre parênteses.

Figura 9 – Número de vagens, número de sementes e número de vagens com uma semente de plantas de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.

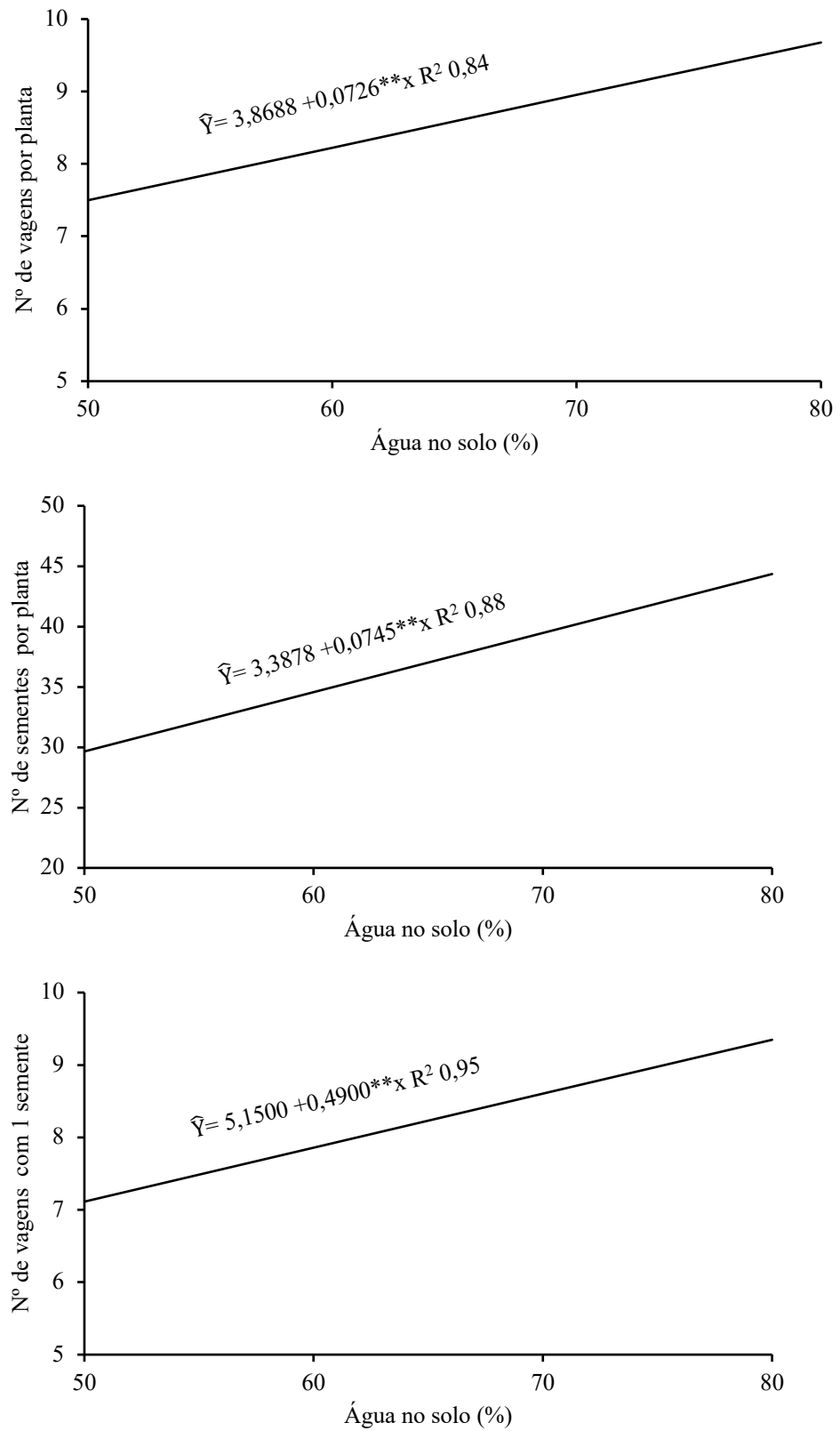
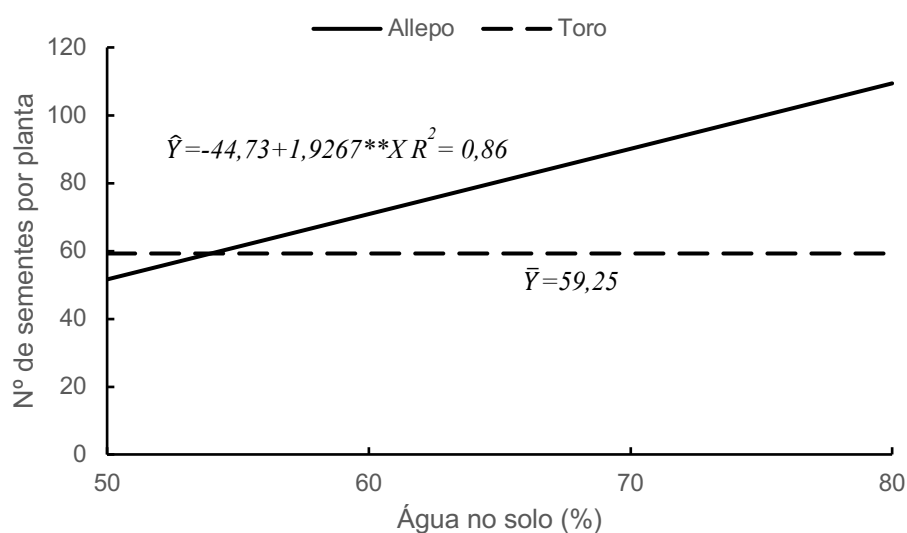


Tabela 6 – Comparação de médias do número de sementes por planta de variedades de grão-de-bico, em cada nível da água disponível no Solo, Montes Claro-MG, 2024.

Variedade	Água disponível no solo (% da Capacidade de Campo)			
	50	60	70	80
Aleppo	7,35a (53,67)	9,28a (86,00)	9,49a (91,00)	11,30a (127,33)
Toro	6,82a (46,00)	7,64a (58,00)	8,78a (77,33)	7,24b (58,33)

As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferenciam entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 10 – Número de grãos planta de duas variedades de plantas de grão-de-bico, em função da água disponível no solo.



CONCLUSÃO

A presente tese investigou o impacto do manejo hídrico na produtividade do grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.), destacando sua relevância para práticas agrícolas sustentáveis e eficientes no uso da água. Ao longo dos três capítulos, foram aplicadas metodologias capazes de estimar o coeficiente cultural da leguminosa no Norte de Minas Gerais, revelando diferenças no uso da água entre cultivares. Esses resultados enfatizam o potencial do manejo hídrico como ferramenta estratégica na agricultura tropical, contribuindo para a elevação da produtividade, redução do uso de insumos minerais, recuperação da saúde do solo e mitigação dos impactos ambientais.

Os dados demonstram que a disponibilidade hídrica influencia significativamente o crescimento e rendimento do grão-de-bico, sendo que níveis mais elevados de água proporcionam maior número e peso de vagens. A adaptação das cultivares 'BRS Aleppo' e 'BRS Toro' a condições de estresse hídrico moderado, evidenciada pela produtividade satisfatória entre 50 e 80% da capacidade de campo, indica sua viabilidade para ambientes semiáridos.

Assim, os resultados obtidos contribuem para o avanço do conhecimento nas áreas de manejo hídrico, fisiologia vegetal e sustentabilidade agrícola em regiões tropicais e semiáridas. Para o futuro, recomenda-se a realização de experimentos em escala de campo, com o intuito de consolidar práticas que promovam o desenvolvimento sustentável e a segurança alimentar, fortalecendo sistemas agrícolas resilientes e econômicos no Brasil e em regiões com clima semelhante.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AVELAR, R. I. S. Produção e qualidade de sementes de grão-de-bico em diferentes épocas de plantio no Norte de Minas. 2016. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2016.
- AVELAR, R. I. S.; DA COSTA, C. A.; ROCHA, F. S.; DE OLIVEIRA, N. L. C.; NASCIMENTO, W. M. Produtividade do grão-de-bico em diferentes épocas de semeadura. *Revista Caatinga*, v. 31, n. 4, p. 900-906, 2018.
- BANDEIRA, D. et al. Produção de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) adubado com biocarvão de cana-de-açúcar. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 15, e196111536827, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i15.36827>..
- BIANCHI, L.; GERMINO, G. H.; DE ALMEIDA SILVA, M. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. *Acta Iguazu*, v. 5, n. 4, p. 15-32, 2016.
- BITTENCOURT, P. P.; SILVA, L. N. N. Estresse hídrico em plantas: aspectos morfofisiológicos, adaptações e mecanismos de resposta. In: DELLA, A. P. et al. *VIII Botânica*

no Inverno 2018. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Botânica, p. 235, 2018.

BLUM, A. Drought stress and its impact. Disponível em: <http://www.plantstress.com/articles/drought_i/drought_i.htm#repercussions>. Acesso em: 01 dez. 2023.

BOURGAULT, M. et al. Crop physiology and agronomy research to advance wheat in variable environments. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 1-14, 2020.

BRODERSEN, C. R.; RODDY, A. B.; WASON, J. W.; MCELDRONE, A. J. Functional status of xylem through time. *Annual Review of Plant Biology*, v. 70, p. 407–433, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100455>..

GIMENEZ, et al. Linking phenology, harvest index, and genetics to improve chickpea grain yield. *Journal of Experimental Botany*, v. 76, n. 6, p. 1658-1677, 2024. Oxford University Press.

HOSKEM, B. C. S. et al. Produtividade e qualidade de sementes de grão-de-bico no Norte de Minas Gerais, Brasil. *Agrária: Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 3, p. 261-268, 2017.

KOMAL, D. et al. Response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) productivity under different irrigation frequencies and mulching. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 7, n. 9, p. 3638-3642, 2018.

KIRAN, A. et al. Low temperature induced aberrations in male and female reproductive organ development cause flower abortion in chickpea. *Plant, Cell and Environment*, v. 42, n. 7, p. 2075–2089, 2019.

MOREIRA, E. G. S. Grão-de-bico cultivado sob condições de manejo em sequeiro e irrigado. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Goiás, Unidade Universitária de Ipameri, Ipameri, 2020.

NASCIMENTO, C. S.; SILVA, M. A. Análise da interação genótipo x ambiente em cultivares de grão-de-bico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 13, n. 4, p. 312-320, 2019.

NASCIMENTO, C. S. et al. Avaliação agronômica de cultivares de grão-de-bico em condições de sequeiro. *Revista Científica Rural*, v. 18, n. 2, p. 145-153, 2016.

NASCIMENTO, W. M.; SILVA, P. P.; ARTIAGA, O. P.; SUINAGA, F. A. Grão-de-bico. In: *Hortaliças Leguminosas*. Brasília, DF: Embrapa, 2016.

PURUSHOTHAMAN, R.; VADEZ, V.; NESER, S.; GAUR, P. M. Root traits confer grain yield advantages under terminal drought in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Field Crops Research*, v. 202, p. 62–69, 2017.

QUEIROGA, V. P. et al. Potencial produtivo do grão-de-bico sob diferentes condições edafoclimáticas. *Agronomia Tropical*, v. 45, n. 1, p. 89-98, 2021.

QUEIROGA, V. P.; GIRÃO, Ê. G.; ALBUQUERQUE, E. M. B. *Grão-de-bico (Cicer arietinum L.): tecnologias de plantio e utilização*. Campina Grande: AREPB, 2021.

RANI, A. et al. Developing climate-resilient chickpea involving physiological and molecular approaches with a focus on temperature and drought stresses. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, n. 1759, p. 1-29, 2020.

SILVA, J. R. Eficiência de utilização da água pelo grão-de-bico: aspectos fisiológicos e agronômicos. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 3, p. 345-356, 2011. Disponível em: <<https://dspace.uevora.pt>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ZIPPER, S. C.; QIU, J.; KUCHARIK, C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 9, p. 1-12, 2016.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese teve como objetivo investigar e mensurar a produtividade do grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) sob níveis diferentes de água disponível no solo como estratégia para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes no que se refere ao uso eficiente da água. Ao longo dos três capítulos que compõem este trabalho, foram exploradas ferramentas que permitem estimar o coeficiente da cultura do grão de bico no Norte de Minas Gerais os resultados evidenciaram que existe diferença entre as espécies quanto ao uso da água. Esses achados reforçam o potencial como ferramentas estratégicas para a agricultura tropical, contribuindo não apenas para o aumento da produtividade do grão-de-bico, mas também para a redução da dependência de insumos minerais, recuperação da saúde do solo e mitigação de impactos ambientais. A adoção de manejo do uso da água para culturas como o grão-de-bico pode representar avanço importante na consolidação de sistemas agrícolas mais resilientes, econômicos e sustentáveis no Brasil e em outras regiões de clima semelhante.

Os resultados obtidos nesta tese contribuem de forma relevante para o avanço da ciência nas áreas de manejo hídrico, fisiologia vegetal e manejo sustentável de culturas em regiões tropicais e semiáridas. Perspectivas futuras incluem a realização de ensaios de campo em larga escala e, além disso, este estudo abre caminhos para o desenvolvimento sustentável e soberania alimentar.