

Impactos do déficit hídrico na cultura do feijão: alterações morfofisiológicas e bioquímicas

Impacts of water deficit on bean crops: morphophysiological and biochemical changes in response to water stress

Denise Cargnelutti⁺, Aloma Hancke, Gabriela de Melo Santiago, Lisandro Tomas da Silva Bonome

Universidade Federal da Fronteira Sul

Resumo. O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) representa uma das principais leguminosas cultivadas no Brasil, sendo essencial na alimentação básica da população devido ao seu elevado valor nutricional, cultural e socioeconômico. Apesar de seu potencial produtivo, a produtividade do feijoeiro ainda é considerada baixa, principalmente em sistemas agrícolas de base familiar. Entre os fatores que limitam sua produção, destacam-se os estresses abióticos, em especial o déficit hídrico, que se intensifica frente às mudanças climáticas globais. A escassez de água, especialmente durante estágios fenológicos críticos como o florescimento e a formação de vagens, compromete o desenvolvimento fisiológico, bioquímico e morfológico da planta, refletindo negativamente na produtividade final. Além disso, a frequência e intensidade de eventos de seca tendem a aumentar, exigindo a adoção de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender as respostas da planta ao estresse hídrico, com destaque para mecanismos como fechamento estomático, acúmulo de solutos compatíveis, alteração na atividade antioxidante e modificação no crescimento radicular. O entendimento desses mecanismos é essencial para subsidiar práticas agrônômicas que minimizem os efeitos do déficit hídrico, promovendo maior resiliência das plantas. Tecnologias sustentáveis, como o uso de bioinsumos, microrganismos promotores de crescimento vegetal e fertilizantes de liberação controlada, despontam como alternativas promissoras para mitigar os impactos do estresse hídrico. Assim, investir em estratégias eco-friendly pode contribuir para a sustentabilidade da produção de feijão em cenários de maior restrição hídrica, preservando os recursos naturais e assegurando a segurança alimentar.

Palavras-chaves Estresse abiótico, Mecanismos de resistência, Mudanças climáticas, Tecnologias eco-friendly

Abstract. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is one of the main legume crops cultivated in Brazil, playing a crucial role in the basic diet of the population due to its high nutritional, cultural, and socioeconomic value. Despite its productive potential, bean yield is still considered low, especially in smallholder farming systems. Among the limiting factors, abiotic stresses—particularly water deficit—stand out and have become increasingly severe due to global climate change. Water scarcity, especially during critical phenological stages such as flowering and pod formation, compromises the physiological, biochemical, and morphological development of the plant, ultimately reducing yield. Furthermore, the increasing frequency and intensity of drought events demand the adoption of more efficient and sustainable management strategies. In this context, it is essential to understand the plant's responses to water stress, with emphasis on mechanisms such as stomatal closure, accumulation of compatible solutes, changes in antioxidant activity, and alterations in root growth. Understanding these mechanisms is fundamental to support agronomic practices that mitigate the effects of water deficit and promote greater plant resilience. Sustainable technologies, such as the use of bioinputs, plant growth-promoting microorganisms, and controlled-release fertilizers, emerge as promising alternatives to reduce the impacts of water stress. Therefore, investing in eco-friendly strategies may contribute to the sustainability of bean production under water-limited conditions, preserving natural resources and ensuring food security.

Keywords: Abiotic stress, Water stress, Resistance mechanisms, Climate change, Eco-friendly technologies

Contextualização e análise

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma cultura de grande importância no Brasil, com relevância nutricional, social e econômica. Cultivado

em todo o território nacional, em algumas regiões são realizadas até três safras por ano (GROSSELLI 2021). Na safra 2021/2022, a produção atingiu 2.996,60 mil toneladas em uma área de 2.854,20 mil

ha, com produtividade média de 1.050 kg ha⁻¹ (CONAB 2021). Fonte essencial de proteínas, fibras, minerais e vitaminas, o feijão integra a base alimentar da população brasileira, sendo também fortemente influenciado por aspectos culturais (DIDONET & ALCÂNTARA 2021).

Cerca de 70% da produção está nas mãos de agricultores familiares, que têm buscado tecnologias agrícolas para melhorar a produtividade (Hoffmann, 2014). Apesar disso, desafios persistem, entre eles o déficit hídrico, um dos principais fatores limitantes ao rendimento. Por ser uma planta C3, o feijão é sensível à escassez hídrica em todos os estádios fenológicos, apresentando distúrbios morfológicos, fisiológicos e bioquímicos que culminam em perdas significativas (JORGE et al. 2020, CAMPOS et al. 2021).

As mudanças climáticas têm provocado aumento das temperaturas e alterações no regime pluviométrico, o que agrava o cenário hídrico (ZHUANG & ZHANG 2020). No Brasil, observa-se aumento contínuo das temperaturas desde 1961, com recordes em 2015 e 2019 (FIORAVANTI 2020), além de redução da precipitação em regiões como a Amazônica e a Nordeste (MERENGO 2008, CARVALHO et al. 2020).

Essas alterações são consequência de atividades antrópicas como queima de combustíveis fósseis, desmatamento e uso intensivo de defensivos, o que contribui para a degradação dos ecossistemas (CORRÊA & CORRÊA 2020; XU et al., 2020). Além disso, práticas agrícolas inadequadas, como o uso excessivo de fertilizantes fosfatados, contribuem para a salinização do solo, dificultando a absorção de água pelas plantas.

Diante disso, pesquisas têm buscado identificar os mecanismos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos associados à resistência ao estresse hídrico (BORELLA et al. 2017, BOSHKOVSKI et al. 2020, CAMPOS et al. 2021) e desenvolver técnicas de manejo e cultivares mais adaptadas (SÁNCHEZ-REINOSO et al. 2020, SANTIAGO et al. 2022).

Dada a relevância socioeconômica da cultura do feijão no Brasil e a expressiva quantidade de estudos sobre sua resposta ao déficit hídrico, o presente trabalho objetivou reunir e apresentar dados atualizados sobre os efeitos do déficit hídrico no feijão. Foram considerados parâmetros bioquímicos, fisiológicos e morfoagronômicos, com o intuito de caracterizar as alterações promovidas por essa condição adversa ao longo do desenvolvimento da cultura. Além disso, com o objetivo de contribuir para o manejo sustentável desse estresse, o presente estudo também analisou genótipos e características genotípicas de cultivares resistentes, e os métodos alternativos de manejo do feijão sob déficit hídrico.

Na próxima seção são evidenciados o desenvolvimento da pesquisa, que descreve acerca das alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímica, efeitos no rendimento da cultura, manejo e tecnologias alternativas para minimizar os efeitos do déficit hídrico, cultivares resistentes e variedades crioulas e, por último, as considerações finais da pesquisa.

Alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas

Sob déficit hídrico, as plantas redirecionam seu metabolismo para a sobrevivência, ativando mecanismos de economia de água que, embora eficientes, frequentemente resultam em menor produtividade (BARRETO et al., 2022; YOSHIDA; FERNIE, 2024).

Alterações morfológicas incluem redução no crescimento do caule, área foliar e número de ramos, independentemente da cultivar, afetando o acúmulo de biomassa e, por consequência, o rendimento (Figura 1) (BOWNE et al. 2011; KESHAVARZ & KHODABIN 2019; TAPIA et al. 2022; DAN TATAGIBA et al., 2024). A intensidade do estresse, o estágio fenológico e o genótipo influenciam a magnitude dessas alterações (SANTOS & CARLESSO 1998).

A depender do genótipo, a exposição de plantas ao déficit hídrico no início do ciclo da cultura pode provocar um declínio (MATHOBO et al. 2017) ou um incremento (PÓLON-PEREZ et al. 2013) na biomassa dos órgãos quando comparado ao déficit aplicado no final do ciclo. As restrições hídricas no solo na fase logo após a emergência à floração, combinadas com a fase de floração plena à maturidade fisiológica das plantas resultam em plantas de menor estatura e índice de área foliar, sendo a altura da planta a mais sensível (CARVALHO et al. 2016). Sob condições de déficits mais severos, a redução da fotossíntese parece estar mais relacionada a diminuição da área foliar, como consequência da redução da turgescência celular, que tem impacto direto na divisão e expansão celular (SANTOS & CARLESSO 1998). Além disso, a fotossíntese pode ser limitada pela menor eficiência dos cloroplastos em fixar o CO₂ (YORDANOV et al. 2003).

Fisiologicamente, o déficit hídrico reduz o potencial hídrico da folha, condutância estomática, taxa de assimilação de CO₂ e a transpiração, elevando a temperatura foliar (Figura 1) (TAIZ et al. 2021). Essas alterações afetam o crescimento e, consequentemente, o rendimento (CHAVES 1991, GRANT 1992). Os mecanismos de adaptação variam conforme a severidade do estresse e o genótipo da planta.

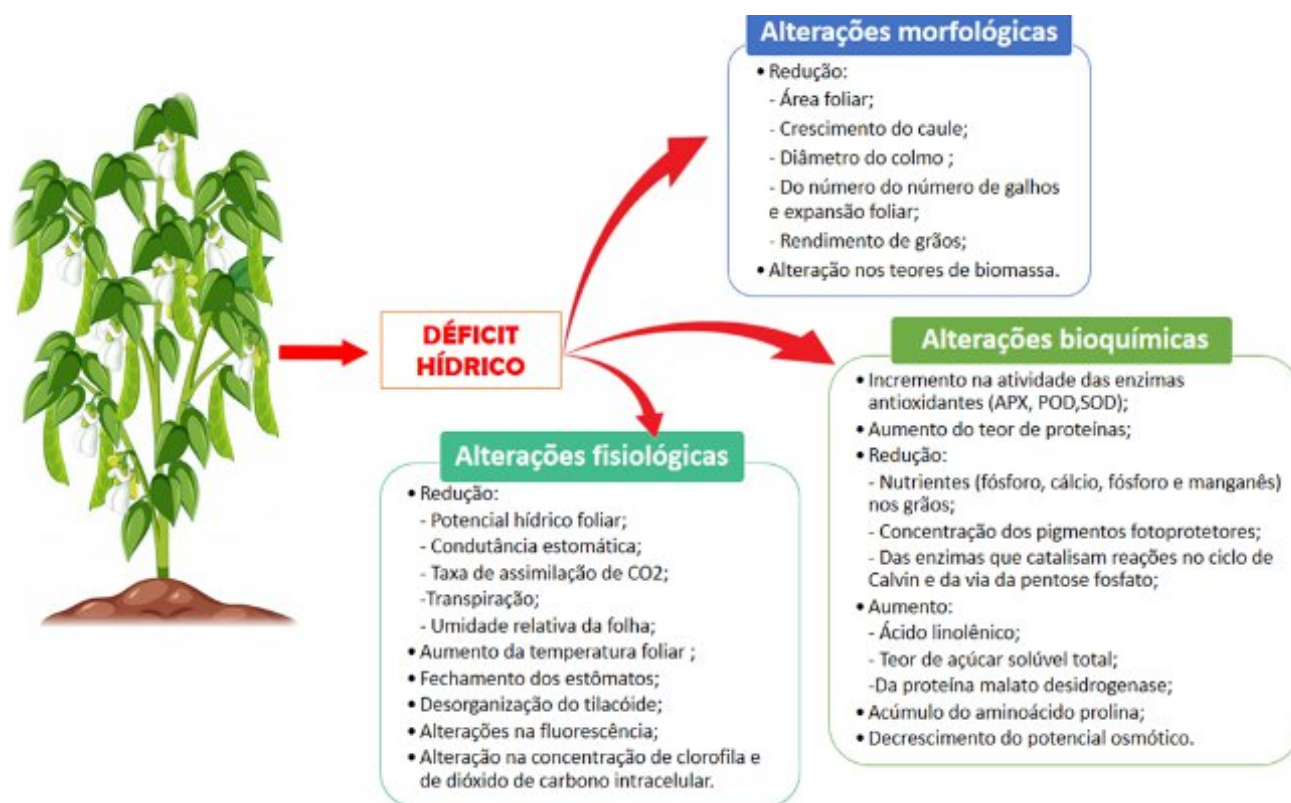


Figura 1. Efeito do déficit hídrico em aspectos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos no feijão.

Fonte: Autores, 2025.

O fechamento estomático, aliado à desorganização dos tilacóides e redução da taxa de transpiração, compromete a fotossíntese. Há também alterações nos níveis de clorofila e CO₂ intercelular, que variam conforme a intensidade do estresse (BOWNE et al. 2011, MATHOBO et al. 2017; ARTEAGA et al. 2020, AL-AMRI 2021). A limitação da condutância estomática afeta o transporte de nutrientes e pode representar uma estratégia de prevenção contra embolias no xilema (BOWNE et al., 2011, BORELLA et al. 2017).

Além disso, o estresse hídrico induz mecanismos alternativos como o quenching não fotoquímico, que dissipa energia luminosa em forma de calor, protegendo o fotossistema II (WARE et al. 2015; SANTIAGO et al. 2022). A escassez hídrica também interfere diretamente na etapa fotoquímica da fotossíntese, ao comprometer a fotólise da água e a produção de ATP, essencial à síntese de açúcares.

No aspecto bioquímico, ocorre incremento na atividade de enzimas antioxidantes como ascorbato peroxidase (APX), peroxidase (POD) e superóxido dismutase (SOD), além de alterações nos teores de proteínas e nutrientes (fósforo, cálcio, ferro e manganês) nos grãos (SILVA 2018; BOSHKOVSKI et al. 2020; ABD EL MAGEED et al. 2023) (Figura 1).

A produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) é neutralizada por antioxidantes e enzimas protetoras, além de peroxiredoxinas mitocondriais, tioredoxinas (equilíbrio redox do tiol), e a enzima glutatona S-transferase (ZADRAZNIK et

al. 2013; OLIVEIRA NOVAIS ARAÚJO et al., 2021). O déficit hídrico também afeta proteínas fotossintéticas e metabólicas. As proteínas intensificadoras de oxigênio (OEE1 e OEE2) no fotossistema II, em que a OEE2 é responsável por catalisar a clivagem da água e a OEE1 favorece a estabilização do manganês necessário para a montagem e estabilização do núcleo do PSII, apresentam concentração variada conforme a variedade do feijão cultivado. Enzimas do ciclo de Calvin e da via das pentoses fosfato, como transcetolase e ribulose fosfato 3-epimerase, têm sua atividade reduzida. Já a malato desidrogenase tende a ser mais abundante, influenciando o rendimento (ZADRAZNIK et al. 2013).

Outras alterações incluem redução de pigmentos fotoprotetores (neoxantina, xantofilas e luteína), ácido graxo hexadecatrienóico, amido e Rubisco. Em contraponto, aumentam os teores de ácido linolênico e solutos como sacarose, glicose e arabinose (GONZÁLEZ-CRUZ & PASTENES 2012; RAMALHO et al. 2013). A osmorregulação é favorecida pelo acúmulo de solutos compatíveis, como a prolina, aminoácido sensível ao estresse hídrico e indicador de resistência (TORABIAN et al. 2018, ARTEAGA et al. 2020).

Efeitos no rendimento da cultura

A demanda hídrica do feijão é influenciada por diversos fatores, como época de semeadura, variedade, condições edafoclimáticas e estágio de desenvolvimento (TATAGIBA et al. 2013). As fases reprodutivas (R5, R6 e R7) são especialmente

sensíveis à escassez de água, resultando em maior variação no rendimento da cultura. Parâmetros como número de vagens por planta e grãos por vagem são amplamente utilizados na avaliação da produtividade, uma vez que sua elevação está diretamente associada ao aumento da produção.

Considerando que cerca de 60% da produção mundial de feijão ocorre sob déficit hídrico (POLÓN-PÉREZ et al. 2017), é fundamental compreender como o estresse hídrico afeta o desempenho da cultura e quais mecanismos de adaptação e aclimação podem ser explorados. Diversos estudos nacionais e internacionais têm investigado esses aspectos, com ênfase nos impactos sobre o rendimento e a fisiologia da planta (Tabela 1).

Dada a importância socioeconômica e alimentar do feijão no Brasil, grande parte das pesquisas relaciona a produtividade ao fornecimento de água com base na evapotranspiração da cultura (ETc). O objetivo é determinar a lâmina de irrigação ideal para maximizar o rendimento. Os resultados indicam um comportamento linear crescente no número de vagens por planta até a reposição de 100% da ETc. Acima desse limite, observa-se redução gradual na produção, possivelmente devido à menor aeração do solo e à consequente respiração anaeróbica, que prejudica a absorção de nutrientes e promove a lixiviação (Tabela 1) (CONCEIÇÃO et al. 2018).

O número de vagens pode ser influenciado pelo período e sistema de cultivo (campo aberto ou casa de vegetação), além da cultivar utilizada (CONCEIÇÃO et al. 2017, 2018). Quando o estresse hídrico ocorre na fase de florescimento, os prejuízos produtivos são ainda mais significativos, pois esse é o estágio de maior demanda hídrica da planta (Fogaça; Castro; Barbosa, 2023) (Tabela 1).

Uma estratégia para minimizar a evaporação do solo é o uso de plantas de cobertura, que mantêm a umidade superficial, reduzem a temperatura, controlam a erosão e favorecem a ciclagem de nutrientes (REGINATTO et al. 2020). Apesar de ser uma prática comum entre pequenos agricultores, ainda são escassas as informações sobre a espécie mais adequada, densidade de semeadura e seus efeitos sobre o solo e o rendimento do feijão.

Torres et al. (2013) verificaram maior produção de vagens quando o feijão (cv. Pérola) foi cultivado sob palhada de milheto, em comparação com coberturas de crotalária e feijão-de-porco (Tabela 1), possivelmente devido à maior produção de biomassa do milheto. Dianatmanesh et al. (2022) também observaram que a incorporação de resíduos de trigo e a adição de nitrogênio contribuíram para atenuar as perdas de rendimento em condições de estresse hídrico. No entanto, quando o déficit hídrico coincide com a fase de florescimento, a cobertura do solo não é suficiente para melhorar a disponibilidade hídrica, e os impactos negativos sobre a produtividade persistem (BRITO et al. 2016).

Independentemente do genótipo, os danos provocados pelo déficit hídrico são mais intensos durante a floração. Ainda que cultivares mais tolerantes apresentem perdas menores, oito dias de estiagem nessa fase já são suficientes para comprometer a produção, e nem sempre as coberturas vegetais são eficazes para mitigar os prejuízos (BRITO et al. 2016). A quantidade de fitomassa seca disponível influencia diretamente na proteção do solo e na redução da evaporação. Para um desempenho satisfatório da cultura, recomenda-se ao menos 6 Mg ha⁻¹ de cobertura seca (TORRES et al. 2013); quanto maior a quantidade de biomassa, maior tende a ser o rendimento do feijão.

Manejo e tecnologias alternativas para minimizar os efeitos do déficit hídrico

Diante das limitações tecnológicas enfrentadas por pequenos agricultores e da necessidade de reduzir os impactos ambientais e as emissões responsáveis pelo aquecimento global, torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, ou "eco-friendly". Essas tecnologias devem ser eficazes no manejo de culturas sob escassez hídrica e, ao mesmo tempo, apresentar baixo impacto ambiental. Entre as estratégias promissoras destacam-se o uso de biochar e o consórcio entre leguminosas e gramíneas (LIU et al. 2022) bem como a inoculação com microrganismos simbióticos, como fungos e bactérias (GANJEALI et al. 2018, LIMA et al. 2019, SANTIAGO et al. 2022).

Bioestimulantes, compostos de origem vegetal ou microbiana contendo fitormônios, betaínas, alginatos e outras substâncias bioativas, atuam positivamente na fisiologia vegetal, promovendo crescimento e desenvolvimento em condições de estresse hídrico (CAVALCANTE et al. 2020; FERREIRA et al. 2020). Extratos de algas, vitaminas como a nicotinamida (ABREU et al. 2020) e extratos vegetais contribuem para o aumento do número de grãos por vagem e da produtividade do feijão. Muitos desses compostos são naturalmente produzidos por bactérias micorrízicas, destacando-se o ácido abscísico (LUDWIG-MULLER 2000).

Estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de identificar e avaliar a eficácia desses microrganismos. Ganjeali et al. (2018) demonstraram que plantas de feijão micorrizadas com *Glomus mosseae* apresentaram maior assimilação de CO₂, conteúdo relativo de água, taxa de transpiração, atividades enzimáticas antioxidantes (SOD, PPO, POX), além de maior acúmulo de prolina e proteínas solúveis, e menor resistência estomática. A inoculação com *Bradyrhizobium* também tem se mostrado eficaz na manutenção do status hídrico da planta (ANDRADE 2018).

Tabela 1. Estudos sobre o rendimento da cultura do feijão em condições de déficit hídrico. Fonte: dados da pesquisa

Cultivar	Localização	Tratamentos	NVP	NGV	PMG	Rendimento (Kg ha ⁻¹)	Autores
BRS Valente	Alegrete - RS	<i>Reposição da ETC:</i>	5,8	3,54 ^{ns} (média dos tratamentos)	0,22 ^{ns} (média dos tratamentos)	1.493,5	Conceição et al. (2018)
		25%	7,8			2.480	
		50%	9			3.090	
		75%				3.265,4	
		91,2% (estipulado)	11,08			3.400	
		100 %	8,1			2.680,9	
		125%					
BRS Valente	Alegrete - RS	<i>Reposição da ETC:</i>	15			1.900	Conceição et al., (2017)
		0%	17			3.850	
		50%	19			4.100	
		70%	20			4800	
		100%					
Pérola	Rio Largo - Alagoas	<i>- DH no florescimento com as coberturas:</i>				101	Brito et al. (2016)
		Descoberto				103	
		Palha				136	
		Plástico					
BRS Ametista	Botucatu-SP	<i>-Depleção</i>					Brito et al. (2015)
		30%	3,00	3,90			
		40%	3,40	4,70			
		50%	3,60	3,63			
		60%	4,18	3,78			
		70%	3,28	4,20			
		<i>-Tensão</i>					
		-30 kPa	3,58	4,65			
		-40 kPa	3,17	4,07			
		-50 kPa	3,34	4,65			
		-60 kPa	2,73	4,45			
		-70kPa	3,43	4,65			
Pérola		<i>Reposição de água</i>				3.993,43	Santana et al. (2014)
		70%				4.775,03	
		100%				4.090,48	
		130%				3.327,85	
		160%					
IAC Alvorada	Uberaba - MG	70%				3.861,69	
		100%				4.097,42	
		130%				3.034,47	
		160%				2.412,69	
BRSMG Majestoso		70%				3.036,66	
		100%				4.422,54	
		130%				3.859,82	
		160%				3.539,49	
BRSMG Madrepérola		70%				3.657,90	
		100%				4.659,00	
		130%				4.006,56	
		160%				2.579,03	
Pérola	Uberaba - MG	<i>Reposição da ETC:</i>	49,70	3,5		790	Torres et al. (2013)
		40%	68,70	3,96		1.200	
		70%	103,7	5,73		2.200	
		100 %	98,50	4,93		2.100	
		130%	93,20	4,10		1.000	
		160%					
		<i>- Cobertura</i>	90,26	4,74		1.690	
		Milheto	87,66	4,63		1.500	
		Crotalaria	82,66	4,54		1.510	
		Pousio	70,20	4,54		1.130	
		Feijão de porco					

Pérola		-Déficit hídrico de 15 dias no florescimento	11,87	5,87	Vale et al. (2012)
		-Condição normal de irrigação	14,99	7,65	
IPR Juriti	Lages-SC	-Déficit hídrico de 15 dias no florescimento	8,25	3,92	
		-Condição normal de irrigação	14,27	5,29	

NVP - Número de vagens por planta; NGV - Número de grãos por vagem; PMG - Peso médio dos grãos (g); ETc - evapotranspiração da cultura; DH - Déficit hídrico; ^{ns} - não significativo.

Petropoulos *et al.* (2019) avaliaram quatro bioestimulantes comerciais (Nomoren, Twin-Antistress, Veramin Ca e EKOprom) e constataram aumento nos teores de compostos fenólicos, especialmente nos frutos da primeira colheita e sementes de plantas sob estresse hídrico, além da inibição de patógenos e ausência de efeitos citotóxicos. Em contrapartida, Galvão *et al.* (2019) não observaram resultados significativos na mitigação do estresse hídrico com *Bacillus amyloliquefaciens* e sua combinação com extrato de algas marrons (*Ascophyllum nodosum*).

A maioria dos estudos com bioestimulantes destaca a eficácia de fungos e bactérias dos gêneros *Bacillus*, *Glomus*, *Bradyrhizobium*, *Streptomyces*, além de extratos de algas, na atenuação dos danos causados pela escassez hídrica. Esse efeito está associado à ativação dos mecanismos de defesa da planta, incluindo o metabolismo osmorregulador, antioxidante e o aumento na disponibilidade de nutrientes essenciais, como o nitrogênio (GONZÁLEZ *et al.* 2016; LATEF *et al.* 2016; MHLONGO *et al.* 2018; JIMÉNEZ-ARIAS *et al.* 2021).

Contudo, a eficiência desses organismos depende da intensidade do déficit hídrico: sob condições extremas, as plantas podem não conseguir superar os danos causados pela falta de água (FIGUEIREDO *et al.* 2008). Ainda assim, ensaios com microrganismos comprovam sua capacidade de melhorar características morfológicas e fisiológicas, como altura da planta, área foliar, diâmetro do caule, massa fresca, taxa fotossintética, condutância estomática, conteúdo de clorofila, rendimento de grãos e metabolismo antioxidante (APX, prolina, SOD e CAT) (YANNI *et al.* 2016; HEMMATI & RAHMANI 2019).

Dessa forma, os bioestimulantes representam ferramentas valiosas para reduzir os impactos do déficit hídrico no feijão, promovendo maior tolerância ao estresse e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Cultivares resistentes e variedades crioulas

A seleção genética de cultivares de feijão tem se mostrado promissora na identificação de características associadas à resistência ao déficit hídrico, tanto em cultivares comerciais quanto em variedades crioulas. Coelho *et al.* (2010) e Michels *et al.* (2014) revelaram que as variedades crioulas BAF 55 e BAF 75 apresentaram elevado

desempenho produtivo em dois ciclos de cultivo, com destaque para o tamanho de vagens e o peso de mil sementes, indicando seu potencial tanto para programas de melhoramento quanto para uso direto por agricultores. Em relação ao valor nutricional, Pereira *et al.* (2020) observaram que os minerais Ba, Cu, Fe, Mn e Zn apresentaram níveis detectáveis de bioacessibilidade em grãos crus e cozidos.

Tosquy-Valle *et al.* (2014), ao avaliarem cultivares resistentes ao déficit hídrico, identificaram os genótipos CIAT-103-25, NGO-17-99, SEN-70, SCN-2, NCB-229, X02-33-153 e SEN-56 como os mais produtivos, com base no maior número de vagens por planta, embora não tenha havido correlação direta com o número de sementes por vagem ou o peso dos grãos. Utilizando o índice de susceptibilidade ao déficit hídrico, destacaram-se como mais tolerantes os genótipos NCB-229, SCN-2, Jamapa Plus e SEN-70. Embora esse índice seja útil para identificação de genótipos tolerantes, ele não garante necessariamente maior rendimento.

Kalima e colaboradores (Mataa; Kalima; Lungu, 2021) também observaram que características morfofisiológicas relacionadas à fotossíntese podem ser utilizadas como critério de seleção em programas de melhoramento voltados à tolerância ao estresse hídrico. No Brasil, a cultivar Pérola tem se destacado por sua boa produtividade e adaptabilidade nas regiões Sudeste e Nordeste (Tabela 1). Bertoldo *et al.* (2019) apontaram os genótipos BAG40, BAG100 e BAG102 como promissores, por apresentarem menor sensibilidade à redução de temperatura foliar, capacidade fotossintética, número de vagens por planta e número de grãos por vagem.

Estudos como o de Pereira (2019) mostraram a expressão aumentada dos genes PvCYCD7, PvPSK e PvNAM em genótipos de feijão do tipo Carioca tolerantes ao déficit hídrico, sugerindo seu uso como marcadores moleculares em programas de seleção. Outros genótipos mencionados como resistentes incluem os parentais BAT 477 (grupo I) e IAC Alvorada, IPR Uirapuru e BRS Esteio (grupo II), conforme (ARRUDA *et al.* 2019).

Apesar dos avanços, a seleção genética deve ser realizada com cautela, considerando que a uniformidade genética pode aumentar a vulnerabilidade a pragas e doenças, devido à redução da biodiversidade (TITTONELL

2020). Langat *et al.* (2019) reforçam a importância da seleção simultânea de múltiplas características, como condutância estomática, número de ramos, rendimento de grãos e número de vagens por planta, para alcançar resultados mais consistentes em ambientes sob estresse.

Campos *et al.* (2021) apontam que o estresse hídrico severo compromete significativamente o rendimento, e sugerem que a combinação de irrigação moderada com genótipos de crescimento determinado pode ser uma alternativa viável para manter a produção de feijão em cenários de seca.

Entretanto, há escassez de estudos sobre a adaptação de variedades crioulas ao déficit hídrico. Essa lacuna pode estar relacionada à lenta incorporação de práticas agroecológicas nas instituições de ensino e pesquisa, bem como à resistência ao reconhecimento do papel das comunidades camponesas na agricultura convencional. Assim, torna-se essencial incentivar pesquisas voltadas às variedades crioulas, dada sua relevância sociocultural, ecológica e produtiva.

Considerações finais

O déficit hídrico impõe severas limitações ao cultivo do feijão, gerando preocupações entre técnicos e produtores em diferentes regiões do mundo. Seus efeitos variam conforme a intensidade, duração, genótipo e o estágio fenológico em que a planta é exposta. A fase de florescimento, marcada pelo pico da evapotranspiração, é especialmente sensível a esse tipo de estresse. Para lidar com a escassez hídrica, o feijão aciona mecanismos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos adaptativos que visam à sua sobrevivência. Nesse contexto, entender as respostas da planta ao estresse hídrico é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo eficazes, que contribuam para a estabilidade produtiva da cultura mesmo em cenários de irregularidade climática. No feijão, os principais mecanismos acionados durante o déficit hídrico são: fechamento dos estômatos e fluorescência, influenciando diretamente na taxa de assimilação de CO₂, transpiração, temperatura foliar e na fotossíntese. Além disso, verifica-se reduções na área foliar, crescimento da parte aérea e acúmulo de matéria seca das plantas, refletindo no rendimento da cultura. Em condição de déficit hídrico o sistema antioxidante do feijão também é acionado e observa-se reduções na concentração de pigmentos fotossintetizantes, na atividade da rubisco e outras enzimas do ciclo de Calvin. Por outro lado, a prolina parece ser o principal osmólito orgânico produzido pelo feijão para realização do ajustamento osmótico.

Na busca por minimizar os impactos do déficit hídrico no feijão frente às dificuldades de acesso a tecnologias por pequenos agricultores e a necessidade de redução do impacto ambiental, tem crescido a demanda por cultivares resistentes e tecnologias eco-friendly, dentre as quais destacam-se os bioestimulantes e os compostos orgânicos.

Todos, muito promissores na minimização dos prejuízos causados pelo déficit hídrico. Contudo, ainda existe uma grande lacuna acerca de abordagem quanto ao modo de ação destas substâncias e suas interações com outros compostos no feijão.

Agradecimentos

Universidade Federal da Fronteira Sul.

Referências

ABD EL MAGEED, Taia A. *et al.* Glutathione-mediated changes in productivity, photosynthetic efficiency, osmolytes, and antioxidant capacity of common beans (*Phaseolus vulgaris*) grown under water deficit. *PeerJ*, v. 11, p. 1–23, 2023.

ABREU, Mariele Silva *et al.* Ascophyllum nodosum e nicotinamida afetam produtividade do feijoeiro comum. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, p. e597997628, 2020.

AL-AMRI, Salem M. Application of bio-fertilizers for enhancing growth and yield of common bean plants grown under water stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 28, p. 3901–3908, 2021.

ARRUDA, Isabella Mendonça *et al.* Combining Ability for Agromorphological and Physiological Traits in Different Gene Pools of Common Bean Subjected to Water Deficit. *agronomy*, v. 9, n. 371, 2019.

ARTEAGA, Sugenth *et al.* The Use of Proline in Screening for Tolerance to Drought and Salinity in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes. *Agronomy*, v. 10, n. 6, p. 817, 9 jun. 2020.

BARRETO, Pedro *et al.* Metabolism and Signaling of Plant Mitochondria in Adaptation to Environmental Stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, n. 19, p. 11176, 23 set. 2022.

BERTOLDO, Juliano Garcia *et al.* Sensibilidade de genótipos de feijão ao estresse hídrico. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, v. 25, n. 3, p. 36–50, 2019.

BORELLA, Junior *et al.* Differential response to water stress in two tropical common bean cultivars. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 12, n. 3, p. 316–324, 2017.

BOSHKOVSKI, Blagoja *et al.* Relationships of spectral reflectance with plant tissue mineral elements of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under drought and salinity stresses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020.

BOWNE, Jairus *et al.* ABIOTIC STRESS AND METABOLOMICS. *Annual Plant Reviews*, v. 43, p. 61–85, 2011.

BRITO, Jose Edmilson Deodato *et al.* Produtividade

- e eficiência de uso da água em cultivo de feijão sob diferentes coberturas do solo submetido à restrição hídrica. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 10, n. 2, p. 565–575, 2016.
- BRITO, Ramilos Rodrigues *et al.* Níveis de depleção e potencial matricial do solo de textura média na produtividade do feijoeiro. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 9, n. 5, p. 300–309, 2015.
- CAMPOS, Karen *et al.* Physiological and Yield Responses of Green-Shelled Beans (*Phaseolus vulgaris* L .) Grown under Restricted Irrigation. *agronomy*, v. 11, n. 526, 2021.
- CARVALHO, Ailton A. *et al.* Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 15–23, 2020.
- CARVALHO, José Joaquim *et al.* Growth and production of common bean in direct seeding under irrigated deficit condition. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 31, p. 2841–2848, 2016.
- CAVALCANTE, Wendel Soares *et al.* Eficiência dos bioestimulantes no manejo do déficit hídrico na cultura da soja. *Irriga*, v. 25, n. 4, p. 754–763, 2020.
- CHAVES, M. M. Effects of Water Deficits on Carbon Assimilation. *Journal of Experimental Botany*, v. 42, n. 234, p. 1–16, 1991.
- COELHO, Cileide Maria Medeiros *et al.* Características morfo-agronômicas de cultivares crioulas de feijão comum em dois anos de cultivo. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 1, p. 1177–1186, 2010.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos, safra 2021/22 3º levantamento. Brasília: [S.n.], v. 1
- CONCEIÇÃO, Chaiane G. *et al.* Economically optimal water depth and grain yield of common bean subjected to different irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 7, p. 482–487, 2018.
- CONCEIÇÃO, Chaiane Guerra *et al.* Influência de lâminas de irrigação sobre a produção do feijão comum conduzido na 2ª safra. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 11, n. 6, p. 1876–1883, 2017.
- CORRÊA, Larissa de Paula de Albuquerque; CORRÊA, Rayana Suelem Souza. Queimadas na Amazônia em 2019: uma análise sob o aspecto do direito internacional público ambiental. *Cadernos Eletrônicos Direito Internacional sem Fronteiras*, v. 2, n. 2, p. 1–17, 2020.
- DAN TATAGIBA, Sandro *et al.* Uso do silício no crescimento e produção do feijoeiro submetido a diferentes condições hídricas. *Scientific Electronic Archives*, v. 17, n. 3, 30 abr. 2024.
- DIANATMANESH, Marziye *et al.* Yield and yield components of common bean as influenced by wheat residue and nitrogen rates under water deficit conditions. *Environmental Technology and Innovation*, v. 28, 1 nov. 2022.
- DIDONET, Agostinho Dirceu; ALCÂNTARA, Flávia Aparecida. Produção agroecológica de feijão sistema de produção e práticas de manejo. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021.
- FERREIRA, Miller Henrique; NOBRE, Danúbia Aparecida Costa; MACEDO, Willian Rodrigues. Biorreguladores em feijoeiro cultivado sob dois regimes hídricos. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 19, n. 1, p. 54–63, 2020.
- FIGUEIREDO, Márcia V. B. *et al.* Alleviation of drought stress in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L .) by co-inoculation with *Paenibacillus polymyxa* and *Rhizobium tropici*. *Applied Soil Ecology*, v. 40, n. 1, p. 182–288, 2008.
- FIORAVANTI, Carlos. 2019 foi o ano mais quente já registrado no Brasil. *Revista Pesquisa Fapesp*, 2020.
- FOGAÇA, Alisson Marcos; CASTRO, Aline Garcia de; BARBOSA, Eduardo Augusto Agnellos. Physiological and morphological responses of two beans common genotype to water stress at different phenological stages. *Bioscience Journal*, v. 39, p. e39053, 6 abr. 2023.
- GALMÉS, Jeroni *et al.* Rubisco activity in Mediterranean species is regulated by the chloroplastic CO₂ concentration under water stress. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, n. 2, p. 653–665, 2011.
- GALVÃO, Ícaro Monteiro *et al.* Biostimulants action in common bean crop submitted to water deficit. *Agricultural Water Management*, v. 225, p. 105762, 2019.
- GANJEALI, Ali *et al.* Influences of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on morphophysiological traits and biochemical compounds of common bean (*Phaseolus vulgaris*) under drought stress. *South African Journal of Plant and Soil* ISSN:, v. 35, n. 2, p. 121–127, 2018.
- GONZÁLEZ-CRUZ, Javiera; PASTENES, Claudio. Water-stress-induced thermotolerance of photosynthesis in bean (*Phaseolus vulgaris* L .) plants: The possible involvement of lipid composition and xanthophyll cycle pigments. *Environmental and Experimental Botany*, v. 77, p. 127–140, 2012.

- GONZÁLEZ, Lisbel Martínez *et al.* Efecto de productos bioactivos em plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) Biofertilizadas. Cultivos Tropicales, v. 37, n. 3, p. 165–171, 2016.
- GRANT, Robert F. Interactions between Carbon Dioxide and Water Deficits Affecting Canopy Photosynthesis: Simulation and Testing. Crop Science, v. 32, p. 1322–1328, 1992.
- GROSSELLI, M. A. Influência do uso de pó de rocha basáltica e biocarvão em latosolo vermelho distroférrico e no cultivo orgânico de *Phaseolus vulgaris* antecedido por plantas solubilizadoras. [S.l.]: Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Laranjeiras do Sul, PR, 2021.
- HEMMATI, A.; RAHMANI, H. Asadi. The Effect of Microbial Inoculation on Water Use Efficiency and Yield of Bean under Drought Stress Conditions. Journal of Water and Soil Science, v. 4, p. 199–209, 2019.
- HOFFMANN, Rodolfo. A agricultura familiar produz 70% dos alimentos consumidos no Brasil? Segurança Alimentar e Nutricional, v. 21, n. 1, p. 417–421, 2014.
- JIMÉNEZ-ARIAS, David *et al.* A Beginner ' s Guide to Osmoprotection by Biostimulants. Plants, v. 10, n. 363, 2021.
- JORGE, Josefát Gregorio *et al.* Genome-wide transcriptional changes triggered by water deficit on a drought- tolerant common bean cultivar. BMC plant biology, v. 20, n. 525, p. 1–20, 2020.
- KESHAVARZ, Hamed; KHODABIN, Ghorban. The Role of Uniconazole in Improving Physiological and Biochemical Attributes of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Subjected to Drought Stress. Journal of Crop Science and Biotechnology, v. 22, p. 161–168, 2019.
- LANGAT, Charles *et al.* Genetic Variability of Agronomic Traits as Potential Indicators of Drought Tolerance in Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L .). International Journal of Agronomy, 2019.
- LATEF, Arafat Abdel Hamed Abdel *et al.* Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis and Abiotic Stress in Plants : A Review. Journal of Plant Biology, v. 59, p. 407–426, 2016.
- LIMA, Bruna Coelho De *et al.* Bacillus subtilis ameliorates water stress tolerance in maize and common bean. Journal of Plant Interactions, v. 14, n. 1, p. 432–439, 2019.
- LIU, Xuezhi *et al.* Biomass accumulation and water use efficiency of faba bean-ryegrass intercropping system on sandy soil amended with biochar under reduced irrigation regimes. Agricultural Water Management, v. 273, n. January, p. 107905, 2022.
- LUDWIG-MULLER, Jutta. Hormonal Balance in Plants During Colonization by Mycorrhizal Fungi. In: KAPULNIK, Y.; DOUDS, D. D. (Orgs.). Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function. Dordrecht: Springer, 2000. p. 263–264.
- MARENGO, José Antônio. Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008.
- MATAA, Mebelo; KALIMA, Philip; LUNGU, Davies. Morphophysiological Responses of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes to Water Stress. University of Zambia Journal of Agricultural and Biomedical Sciences, v. 5, n. 1, p. 1–17, 2021.
- MATHOBO, Rudzani; MARAIS, Diana; STEYN, Joachim Martin. The effect of drought stress on yield , leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L .). Agricultural Water Management, v. 180, p. 118–125, 2017.
- MHLONGO, Msizi I. *et al.* The Chemistry of Plant – Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Potential for Metabolomics to Reveal Signaling Related to Defense Priming and Induced Systemic Resistance. Frontiers in Plant Science, v. 9, p. 1–17, 2018.
- MICHELS, Adelina Ferreira *et al.* Qualidade fisiológica de sementes de feijão crioulo produzidas no oeste e planalto catarinense. Revista Ciência Agronômica, v. 45, n. 3, p. 620–632, 2014.
- OLIVEIRA NOVAIS ARAÚJO, Bruno *et al.* Desempenho bioquímico de plântulas de feijão sob restrição hídrica no início do desenvolvimento. Revista de la Facultad de Agronomía, v. 120, n. 1, p. 070, 20 jun. 2021.
- PEREIRA, Aline Machado *et al.* Evaluation of total and bioaccessible concentration of minerals in creole. Journal of Food Composition and Analysis, v. 94, p. 103622, 2020.
- PEREIRA, Ana Carolina Vieira Zakir. Análise da diversidade genética e da expressão de genes candidatos para tolerância ao déficit hídrico no grupo Carioca (*Phaseolus vulgaris* L.), relacionados ao desenvolvimento do sistema radicular. [S.l.]: Universidade de São Paulo. 1., 2019.
- PETROPOULOS, Spyridon A. *et al.* Bioactive properties of greenhouse-cultivated green beans (*Phaseolus vulgaris* L .) under biostimulants and water-stress effect. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 99, p. 6049–6059, 2019.
- POLÓN-PÉREZ, Ricardo *et al.* Effects of Water Stress on Grain Yield in the Vegetative Phase of bean Cultivation (*Phaseolus vulgaris* L .). Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, v. 26, n. 1, p. 66–70, 2017.

- PÓLON-PEREZ, Ricardo *et al.* Efecto de diferentes intensidades de estrés hídrico en la fase vegetativa en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, v. 22, n. 4, p. 60–64, 2013.
- RAMALHO, J. C. *et al.* Moderate water stress causes different stomatal and non-stomatal changes in the photosynthetic functioning of *Phaseolus vulgaris* L. genotypes. *Plant Biology*, p. 1–14, 2013.
- REGINATTO, Maicon *et al.* Potencial alelopático do extrato aquoso de plantas de adubação verde sobre plantas daninhas e milho. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 10, p. e5859108579, 2020.
- SÁNCHEZ-REINOSO, Alefsi David; LIGARRETO-MORENO, Gustavo Adolfo; RESTREPO-DÍAZ, Hermann. Evaluation of drought indices to identify tolerant genotypes in common bean bush (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, v. 19, n. 1, p. 99–107, 2020.
- SANTANA, Márcio J. *et al.* Estimated production and evapotranspiration of irrigated beans cultivars. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1089–1103, 2014.
- SANTIAGO, Gabriela De Melo; CARGNELUTTI, Denise; CASTAMANN, Alfredo. Microrganismos eficientes: uma ferramenta alternativa para o manejo da seca em plantas de feijoeiro? *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 17, n. 1, p. 1–9, 2022.
- SANTOS, Reginaldo Ferreira; CARLESSO, Reimar. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 287–294, 1998.
- SILVA, Duval Chagas. Aplicação foliar de silício na atenuação de danos de deficiência em cultivares de feijão-caupi. [S.l.]: Universidade Estadual da Paraíba, 2018.
- TAIZ, Lincoln *et al.* *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2021.
- TAPIA, Gerardo *et al.* Water Shortage Affects Vegetative and Reproductive Stages of Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) Chilean Landraces, Differentially Impacting Grain Yield Components. *Plants*, v. 11, n. 749, 2022.
- TATAGIBA, Sandro Dan *et al.* Crescimento e rendimento produtivo do feijoeiro submetido à restrição hídrica. *Engenharia na agricultura*, v. 21, n. 5, p. 465–475, 2013.
- TITTONELL, Pablo. Assessing resilience and adaptability in agroecological transitions. *Agricultural Systems*, v. 184, n. August 2019, p. 102862, 2020.
- TORABIAN, S. *et al.* Leaf gas exchange and grain yield of common bean exposed to spermidine under water stress. *Photosynthetica*, v. 56, p. 1–11, 2018.
- TORRES, José Luiz Rodrigues *et al.* Produtividade de feijão sobre lâminas de irrigação e coberturas de solo. *Bioscience Journal*, v. 29, n. 4, p. 833–841, 2013.
- TOSQUY-VALLE, Oscar Hugo *et al.* Genotipos de frijol negro opaco resistentes a sequía terminal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, v. 5, n. 7, p. 1205–1217, 2014.
- XU, Kai *et al.* Assessing the vulnerability of ecosystems to climate change based on climate exposure, vegetation stability and productivity. *Forest Ecosystems*, v. 7, n. 23, 2020.
- YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, p. 187–206, 2003.
- YOSHIDA, Takuya; FERNIE, Alisdair R. Hormonal regulation of plant primary metabolism under drought. *Journal of Experimental Botany*, v. 75, n. 6, p. 1714–1725, 14 mar. 2024.
- ZADRAZNIK, Tanja *et al.* Differential proteomic analysis of drought stress response in leaves of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Proteomics*, v. 78, p. 254–272, 2013.
- ZHUANG, Yuanhuang; ZHANG, Jingyong. Diurnal asymmetry in future temperature changes over the main Belt and Road regions. *Ecosystem Health and Sustainability*, v. 6, n. 1, 2020.