UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM/ INSTITUTO EDUCAR-MST
CURSO DE AGRONOMIA COM ÊNFASE EM AGROECOLOGIA

MARLON DOS SANTOS VARGAS

PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) SUBMETIDOS A ESTRESSE ABIÓTICO

ERECHIM/RS
2026

MARLON DOS SANTOS VARGAS

PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) SUBMETIDOS A ESTRESSE ABIÓTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Orientadora: Prof. Dra. Denise Cargnelutti

ERECHIM/RS

2026

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Vargas, Marlon dos Santos
PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO (Phaseolus vulgaris L.) SUBMETIDOS A ESTRESSE ABIÓTICO / Marlon dos Santos Vargas. -- 2026.
58 f.:il.

Orientadora: Doutora em Bioquímica Toxicológica Denise Cargnelutti

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Erechim,RS, 2026.

1. Anatomia Vegetal. 2. Estresse Abiótico. 3. Mudanças Climáticas. 4. Sementes Crioulas. 5. Agroecologia. I. Cargnelutti, Denise, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

MARLON DOS SANTOS VARGAS

PLASTICIDADE FENOTÍPICA DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) SUBMETIDOS A ESTRESSE ABIÓTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 02/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof.ª Dr.ª Denise Cargnelutti – UFFS
Orientadora

_____

Prof.ª Dr.ª Carla Maria Garlet de Pelegrin
Avaliador

_____

Prof.ª Dr.ª Josimeire Aparecida Leandrini
Avaliador

_____

Prof. Dr. Matias Köhler
Avaliador

Dedico este trabalho ao Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra -MST, que foi fundamental no meu processo de formação técnico e político. Que não poupou esforços para que a Turma Tia Ciata fosse aberta em 2022, mesmo sem financiamento do Governo Federal.

RESUMO

A cultura do feijão (*Phaseolus vulga*ris L.) possui relevância histórica, alimentar e sociocultural no Brasil, compondo a base alimentar de diferentes povos. Representa importante patrimônio biológico construído por processos históricos de seleção e conservação de sementes. Entretanto, as mudanças climáticas intensificadas e a crescente simplificação dos agroecossistemas impulsionadas pelo modo de produção capitalista têm imposto novos desafios à produção agrícola, especialmente relacionados ao déficit hídrico e às alterações nos regimes de irradiância. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a plasticidade fenotípica de genótipos de feijão submetidos ao estresse abiótico, por meio da avaliação de alterações anatômicas foliares em condições de sombreamento e déficit hídrico. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento de blocos ao acaso, em esquema trifatorial 2 × 2 × 2, com quatro repetições, utilizando uma variedade crioula (Carioquinha) e uma cultivar OGM (BRS FC401 RMD). Foram avaliadas variáveis relacionadas à anatomia foliar, incluindo espessura do mesofilo, camada de parênquima paliçádico, camada de parênquima esponjoso e densidade estomática das faces adaxial e abaxial. As análises anatômicas foram realizadas por microscopia óptica e quantificadas com auxílio do software ImageJ. Os resultados demonstraram que o déficit hídrico e o sombreamento influenciaram significativamente características anatômicas foliares, a variedade crioula apresentou mais camadas de parênquima paliçádico quando exposta ao sol e mais camadas esponjosas sob sombreamento em comparação com a cultivar OGM; evidenciando respostas adaptativas relacionadas à reorganização estrutural dos tecidos fotossintéticos. Também foram observadas diferenças na expressão da plasticidade fenotípica entre os genótipos avaliados, indicando distintas estratégias de adaptação às condições ambientais impostas. Os resultados reforçam que alterações na organização do mesofilo e na densidade estomática constituem mecanismos relevantes para manutenção do metabolismo vegetal sob estresse. Por fim, reitera-se que a diversidade genética representa elemento imprescindível para a resiliência dos agroecossistemas frente à emergência climática, destacando a importância da conservação dos recursos genéticos e da valorização das sementes crioulas como elemento para sistemas agrícolas sustentáveis e adaptativos a hostilidade criada pela contradição entre sociedade e natureza mediada pelo capital.

Palavras-chave: Anatomia vegetal; Estresse abiótico; Mudanças Climáticas; Sementes Crioulas; Agroecologia.

ABSTRACT

Bean cultivation (*Phaseolus vulgaris* L.) has historical, nutritional, and sociocultural importance in Brazil, forming a staple food for different communities and representing an important biological heritage shaped by historical processes of seed selection and conservation. However, intensified climate change and the growing simplification of agroecosystems driven by the capitalist mode of production have created new challenges for agricultural production, especially related to water deficits and changes in light conditions. In this context, this study aimed to analyze the phenotypic plasticity of bean genotypes under abiotic stress by evaluating changes in leaf anatomy under shading and water deficit conditions. The experiment was conducted in a greenhouse, using a randomized block design in a 2 × 2 × 2 factorial arrangement with four replications, involving a local genotype (Carioquinha) and a transgenic cultivar (BRS FC401 RMD). Variables related to leaf anatomy were evaluated, including mesophyll, palisade parenchyma, spongy parenchyma, and stomatal density on both the adaxial and abaxial surfaces. Anatomical analyses were carried out through light microscopy and quantified using ImageJ software. The results showed that water deficit and shading significantly affected leaf anatomical traits, highlighting adaptive responses related to the structural reorganization of photosynthetic tissues. Differences in the expression of phenotypic plasticity between the genotypes were also observed, indicating different strategies for adapting to the environmental conditions applied. The results reinforce that changes in the organization of the mesophyll and in stomatal density are relevant mechanisms for maintaining plant metabolism under stress. Finally, it is reiterated that genetic diversity represents an essential element for the resilience of agroecosystems in the face of the climate emergency, highlighting the importance of conserving genetic resources and valuing traditional seeds as a key factor for sustainable and adaptive agricultural systems in response to the hostility created by the contradiction between society and nature driven by capital.

Keywords: Plant anatomy; Abiotic stress; Climate change; Heirloom seeds; Agroecology.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química e física de solo 30
Tabela 2 – Resumo da análise de variância (ANOVA), com quadrados médios e significância dos fatores déficit hídrico, sombreamento e genótipo, bem como de suas interações, para as variáveis área dos espaços intercelulares do parênquima esponjoso (PE_Ar), número de camadas do parênquima esponjoso (PE_Cam), espessura do mesófilo, densidade estomática abaxial (DEAB) e densidade estomática adaxial (DEAD). 36
Tabela 3 - Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para número de células do parênquima paliçádico, área do parênquima paliçádico (PP_Area), tamanho das células do parênquima paliçádico (PP_Tam), número de camadas do parênquima paliçádico (PP_Cam), número de células do parênquima esponjoso (PE_Qcel) e área do parênquima esponjoso (PE_Area). 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo do experimento. 31
Figura 2 – Características anatômicas da folha de *Phaseolus vulgaris* L. submetidas a condições de déficit hídrico e/ou sombreamento. 35
Figura 3 – Número de camadas do parênquima esponjoso em genótipos de *Phaseolus vulgaris* L. cultivados com e sem sombreamento..... 37
Figura 4– Espessura do mesofilo em folhas de *Phaseolus vulgaris* L. cultivadas com e sem déficit hídrico..... 38
Figura 5 – Espessura do mesofilo em folhas de *Phaseolus vulgaris* L. cultivadas com e sem sombreamento..... 38
Figura 6 - Densidade estomática adaxial em genótipos de *Phaseolus vulgaris* L. cultivados com e sem sombreamento..... 41
Figura 7 - Densidade estomática abaxial em folhas de *Phaseolus vulgaris* L. cultivadas sob condições de déficit hídrico e sombreamento. 43
Figura 8- Número de camadas do parênquima paliçádico em genótipos de *Phaseolus vulgaris* L. cultivados com e sem sombreamento..... 44
Figura 9 – Anatomia foliar de diferentes genótipos de *Phaseolus vulgaris*, em corte transversal. 45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 REFERENCIAL TEÓRICO 14
2.1 BREVE CONTEXTO DA EVOLUÇÃO VEGETAL 14
2.2 INÍCIO DA AGRICULTURA E SIMPLIFICAÇÃO DOS ECOSSISTEMAS 15
2.3 RELAÇÃO SER HUMANO X NATUREZA E RUPTURA DOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS 16
2.4 ESTRESSE ABIÓTICO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS 17
2.5 ANATOMIA VEGETAL 19
2.5.1 Estômato 19
2.5.2 Parênquima paliçádico 20
2.5.3 Parênquima esponjoso 21
2.5.4 Mesofilo 21
2.6 A TRANSGENIA EM VEGETAIS 22
2.6.1 O feijão OGM BRS FC401 RMD 24
2.6.2 Aspectos fisiológicos e morfológicos do BRS FC401 RMD 25
2.7 SEMENTES CRIOULAS E AGROBIODIVERSIDADE 26
3 MATERIAIS E MÉTODOS 29
3.1 SELEÇÃO DAS CULTIVARES E ESTÁDIOS FENOLÓGICOS 29
3.2 CULTIVO EM CASA DE VEGETAÇÃO 29
3.3 TRATAMENTOS 30
3.3.1 Sombreamento 31
3.3.2 Déficit hídrico 32
3.4 DETERMINAÇÕES ANATÔMICAS E DENSIDADE DE ESTÔMATOS 33
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA 34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 35
4.1 PARÊNQUIMA LACUNOSO, MESOFILO E DENSIDADE ESTOMÁTICA 35
4.1.1 Parênquima esponjoso 36
4.1.2 Mesofilo 37
4.1.3 Densidade estomática 40
4.2 PARÊNQUIMA PALIÇÁDICO 43
4.3 INTERAÇÃO ENTRE OS TECIDOS 46
5 CONCLUSÃO 50

REFERÊNCIAS 51

1 INTRODUÇÃO

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pertencente à família leguminoseae ocupa parte importante na história e na alimentação do povo brasileiro, está presente diariamente na mesa de milhões de famílias, especialmente da classe trabalhadora do campo e da cidade. O feijão constitui uma importante fonte de proteína, carboidratos, vitaminas e minerais, contribuindo significativamente para a segurança e a soberania alimentar nacional (Carbonell; Chiorato; Bezerra, 2021; Bassinello, 2009). Mais do que uma commodity agrícola, o feijão representa um patrimônio biológico e cultural cultivado historicamente por diferentes povos e comunidades que selecionaram, conservaram e multiplicaram sementes adaptadas às mais diversas condições ambientais do território brasileiro (Ferreira, 2021).

Nas últimas décadas, entretanto, a produção dessa cultura, bem como outras culturas agrícolas vêm enfrentando desafios crescentes, em respostas ao modo de produção. Na cultura do feijão destaca-se a incidência do mosaico-dourado-do-feijão, doença causada pelo *Bean golden mosaic virus* (BGMV), transmitido pela mosca-branca (*Bemisia tabaci*). Dependendo da intensidade da infestação e das condições edafoclimáticas, as perdas produtivas podem variar entre 40% e 100%, comprometendo significativamente a produção por hectare (Souza *et al*., 2016). Como resposta a esse problema, programas de melhoramento genético desenvolveram cultivares resistentes ao vírus, culminando no lançamento da cultivar OGM BRS FC401 RMD pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Embora a resistência genética represente um importante avanço científico, sua análise não pode ser dissociada das transformações mais amplas que têm ocorrido na agricultura contemporânea. A atual crise climática evidencia os limites de um modelo de desenvolvimento baseado na exploração intensiva dos recursos naturais e na simplificação crescente dos agroecossistemas agrícolas (Altieri, 2012; IPCC, 2023). O aumento da frequência de secas prolongadas, ondas de calor, eventos extremos de precipitação e alterações nos regimes de radiação solar tem afetado diretamente a capacidade produtiva dos sistemas agrícolas em escala global (IPCC, 2023).

Nesse sentido, diversos pesquisadores têm argumentado que a crise ecológica contemporânea não constitui apenas um problema ambiental isolado, mas a manifestação de uma crise mais profunda na relação entre sociedade e natureza mediada pelo capital, que promove uma ruptura sociometabólica (Foster, 2011). Na agricultura, essa dinâmica expressa-se por meio da uniformização genética dos cultivos, da expansão das monoculturas e da

crescente dependência de fertilizantes sintéticos, agrotóxicos, bem como sementes modificadas geneticamente (Altieri, 2012; Gliessman, 2020).

Em contraposição, as sementes crioulas constituem uma importante reserva genética acumulada ao longo de gerações de seleção realizada pelos povos do campo, das águas, e das florestas. Segundo Altieri (2017), a diversidade biológica presente nos agroecossistemas representa um dos principais mecanismos de estabilidade ecológica e resiliência produtiva. Essa diversidade permite que diferentes genótipos expressem estratégias adaptativas distintas diante de condições ambientais limitantes, como déficit hídrico, sombreamento, altas temperaturas e baixa disponibilidade de nutrientes (Altieri, 2017; Bisneto *et al*., 2022).

Sendo assim, as respostas dos vegetais a essas condições podem ser observadas em diferentes níveis de organização biológica, incluindo modificações anatômicas foliares, e estruturais, tais como a epiderme, os estômatos, o parênquima paliçádico e o parênquima esponjoso (Appezzato-da-Glória; Guerreiro, 2006). Estes podem apresentar plasticidade fenotípica e desempenhar funções fundamentais na regulação das trocas gasosas, na absorção de luz e no uso eficiente da água (Taiz *et al*., 2017; Lawson; Matthews, 2020; Terashima *et al*., 2011). Alterações na densidade estomática, na espessura dos tecidos fotossintéticos e na organização do mesofilo podem refletir importantes mecanismos adaptativos desenvolvidos pelas plantas para enfrentar situações de estresse ambiental, como destaca-se nos trabalhos de Niinemets (2009); Poorter *et al*. (2019); Scoffoni; Sack (2017).

Dessa forma, investigar as diferenças anatômicas entre genótipos crioulo e OGM de feijão, torna-se relevante não apenas para compreender os efeitos da alteração genética sobre a estrutura vegetal, mas também para ampliar o conhecimento acerca da capacidade adaptativa desses materiais frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas inerente ao modo de produção capitalista. Sendo assim, esta pesquisa buscou analisar as diferenças anatômicas do mesofilo e de densidade estomática entre genótipos crioulo e OGM de feijão.

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de aprofundar a compreensão das respostas anatômicas do feijão diante de diferentes condições ambientais, bem como pela relevância de gerar conhecimentos que contribuam para a conservação dos recursos genéticos vegetais e para a valorização das sementes crioulas. Ademais, busca-se contribuir para o debate científico acerca das estratégias de adaptação da agricultura às mudanças climáticas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de agroecossistemas que conciliem produtividade, conservação da biodiversidade, sustentabilidade ecológica, segurança alimentar e qualidade alimentar.

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi analisar as diferenças anatômicas foliares de genótipos de feijão submetidos ao sombreamento e ao déficit hídrico. Especificamente, buscou-se: (i) avaliar a anatomia do mesofilo de genótipo crioulo e OGM de feijão submetidos ao sombreamento e/ou déficit hídrico; e (ii) avaliar a densidade estomática da epiderme de plantas de feijão crioulo e OGM expostas ao déficit hídrico e/ou ao sombreamento. A partir dessas análises, buscou-se compreender de que forma a interação entre genótipo e ambiente afeta a organização anatômica foliar e quais são as implicações dessas respostas para o manejo dos agroecossistemas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BREVE CONTEXTO DA EVOLUÇÃO VEGETAL

Compreender o surgimento e a evolução das plantas é fundamental para o estudo dos processos metabólicos, anatômicos e morfológicos das plantas cultivadas e domesticadas, que alimenta o ser heterótrofo. Sua anatomia e morfologia foram moldadas por transformações ao longo do tempo, resultantes da necessidade de adaptação a condições ambientais em constante mudança. Por serem organismos sésseis, o desenvolvimento de estruturas adaptativas é imprescindível para garantir a sobrevivência.

Ao analisar a literatura, observa-se que a história das plantas se inicia a 1,2 bilhões de anos atrás, com os primeiros organismos fotossintetizantes multicelulares, semelhantes às algas verdes, que se desenvolveram em locais embebidos de água (Kenrick e Crane, 1997). Em evolução a estes organismos, as plantas terrícolas começam seus crescimentos há cerca de 470 milhões de anos, durante o período Ordoviciano.

A flora primitiva apresentava características simplórias, tamanhos pequenos e avasculares, ou seja, talvez parecido com o que hoje conhecemos como briófitas (musgos, hepáticas e antóceros), que ainda necessitam da água para a reprodução e tem pouca ou nenhuma capacidade de condução de água e seiva a longas distância (Boyce, 2008). Representantes dessa flora primitiva continuaram evoluindo, principalmente em busca de manter sua vida, um processo natural que se dá a partir da interação entre tempo e organismo, que pressiona naturalmente a desenvolver estruturas que garantam sua vida. Em sucessão, no período Devoniano, samambaias e outras plantas vasculares se diversificaram e foram gradativamente formando as primeiras florestas. Mais tarde, surgem as gimnospermas, plantas com sementes nuas, que dominaram os ecossistemas terrestres no período Permiano. A grande revolução, no entanto, veio com o surgimento das angiospermas (plantas com flores), há cerca de 130 milhões de anos, no período Cretáceo, que permitiu uma estrondosa diversidade de formas e estratégias reprodutivas, inclusive pela associação com insetos polinizadores, como estratégia de mantença da vida (Soltis *et al*., 2008).

Então, o processo de evolução das plantas terrícolas, desde suas origens aquáticas até a adequação aos ambientes da terra, envolveu o desenvolvimento de estruturas especializadas para a sobrevivência, desde tamanho e formato celular, desenvolvimento de organelas, bem como formação de tecidos especializados; ou seja, uma manifestação de plasticidade fenotípica

e fixação por seleção natural ou outras forças evolutivas. E na contemporaneidade, é de extrema importância uma análise holística, para compreender que possíveis alterações nos vegetais podem ser respostas frente aos sintomas gerados pela ruptura dos ciclos biogeoquímicos. Pois, como contextualizado no parágrafo acima, os vegetais têm uma alta capacidade evolutiva, ou seja, plasticidade fenotípica; mas até que ponto as plantas terão capacidade de adaptar-se as condições construídas no ambiente?

A busca por adaptar os vegetais aos ambientes (altas temperaturas, sem chuva, solos salinos, etc.), com interferência antrópica na lógica capitalista, é uma estratégia "remediadora". Em um cenário de amnésia agrobiocultural, os problemas devem ser tratados em conjunto, pois os ambientes hostis forjados para o crescimento e desenvolvimento dos vegetais, sobretudo os domesticados, são fruto da contradição ser humano e natureza mediado pelo capital. Dessa forma, não basta adaptar os vegetais aos ambientes construídos, é necessário alterar as relações ser humano e natureza mediada pelo capital, para construir ambientes (agroecossistemas) resilientes, com alta estabilidade ecológica, ou seja, é necessário a alteração do modo de produção (Altieri, 2017).

2.2 INÍCIO DA AGRICULTURA E SIMPLIFICAÇÃO DOS ECOSSISTEMAS

Com o progresso evolutivo das plantas, bem como sua diversificação foram se formando os ecossistemas terrestres, tornou-se possível a relação mais estreita entre seres humanos e espécies vegetais. Esse processo culminou no início da agricultura, assim que as sociedades humanas passaram a manejar intencionalmente certas plantas para alimentação. E assim que as sociedades humanas nas regiões do Crescente Fértil deixaram de ser nômades para adotar o cultivo de cereais e a domesticação de animais, foi tomado um passo decisivo rumo à formação de comunidades sedentárias e sistemas de produção mais complexos. Mais tarde ocorre a Revolução Agrícola Britânica há qual proporcionou grandes avanços técnicos, como a introdução da rotação de culturas (vagens e cereais), uso de arado com tração animal e surgimento de máquinas como o semeador de Jethro Tull e o misturador de grãos, que aumentou a produtividade por hectare e por trabalhador (Mazoyer; Roudart, 2010).

Nessa perspectiva, no século XIX houve o desenvolvimento da agricultura industrial, com o uso intensivo de fertilizantes sintéticos, agrotóxicos, irrigação e mecanização; expandindo o modelo produtivo, no século XX, esse modelo proporciona que os latifúndios improdutivos, se transforme em monoculturas altamente produtivas, ao mesmo tempo ecologicamente simplificadas (Altieri, 2017). De meados do século XX até a década de 1970,

a chamada Revolução Verde popularizou cultivares de alto rendimento, irrigação e agroquímicos em massa. Com o intuito de acabar com a fome, se alastrou nos campos tais tecnologias, mas que na verdade gerou o processo de concentração fundiária, que até os dias atuais causa conflitos agrários (Stédile, 2005).

Esse sistema de produção, com suas várias tecnologias, para alimentar a lógica capitalista de produção, torna os sistemas produtivos muito mais simplificados; pois é conveniente destacar que agricultura e biodiversidade são um paradoxo, difícil de conciliar, mas é possível simplificar o mínimo possível. Esse sistema centrado no lucro, tem como premissa a homogeneidade dos cultivos agrícolas, tornado os agroecossistemas vulneráveis.

A homogeneização dos cultivos, fruto dessa disseminação do modo de produção centrado subordinação dos vegetais para produtividade por hectare, tem gerado grande problemas na nossa sociedade, e podemos trazer a título de ilustração, como cita Altieri (2012), o caso da batata na Irlanda em 1845, que foi devastada pela requeima da batata (oomiceto, *Phytophthora infestans*) e o da produção de vinhedo devastada, na França, pelo inseto filoxera (*Phylloxera vitifoliae*) em 1863. Ambos os acontecimentos geraram problemas econômicos e sociais, principalmente pela devastação integral de culturas e colapsos produtivos socioeconômicos, por serem baseados em matrizes vegetais geneticamente iguais e arranjadas em homogeneidade. São problemas surgidos desde o início da simplificação dos sistemas de cultivos.

2.3 RELAÇÃO SER HUMANO X NATUREZA E RUPTURA DOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Sob essa ótica, da relação ser humano e natureza, mediada pelo capital, o clima e o tempo nos respondem com mudanças abruptas. Pois o modo de produção capitalista em sua essência, considera a natureza como fonte ilimitada de matérias-primas. Os capitalistas avançam de forma veemente na espoliação dos recursos naturais, desencadeando desequilíbrio voraz nos ecossistemas (Foster, 2011). E como os ecossistemas funcionam em ciclos, ao saquear de forma desordenada os recursos, há uma ruptura nos ciclos biogeoquímicos. Essa ruptura, gera respostas a médio e a longo prazo, que podem ser irreversíveis, afetando de distintas formas os organismos vivos no planeta (Slaveykova, 2025).

A temperatura do planeta, por exemplo, já ultrapassou 1,5 ºC mais quente desde que se iniciou o aquecimento global, estamos assistindo a reverberação da ruptura dos ciclos[1] (Nobre, 2025). O agronegócio, que é uma das formas de manifestação do capital, tem sido o epicentro para as rupturas dos processos biogeoquímicos, que por sua vez, resulta em várias catástrofes. Toda essa análise das relações do modo de produção está intimamente ligada as mudanças climáticas, e está por sua vez, ligada as alterações metabólicas das plantas, que possui uma capacidade imensurável de produzir substâncias e estruturas para garantir sua sobrevivência e de seus descendentes, em meio a um ambiente tão hostil, que o ser humano atendo as lógicas do capital à submete e se submete.

Nesta ordem, a modificação genética das sementes, tem sido utilizada pelos capitalistas para manter ritmos produtivos para geração de lucro. Ou seja, as sementes são subordinadas ao interesse de produtividade, com isso ao não expressar características diversas, a partir do ambiente que está exposta, há uma alienação metabólica produzida pelo ser humano sob o vegetal. E a principal preocupação, pode estar com as plantas alógamas, as quais podem ser contaminadas com polem de vegetais alienados e formar uma geração, cuja expressão tende a seguir lógica de alienação metabólica (Ribeiro *et al*., 2022).

2.4 ESTRESSE ABIÓTICO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O estresse em plantas causado pela seca reduz a atividade fotossintética, condutância estomática, área foliar, podendo gerar no fim uma baixa produtividade. Autores como Gonçalves *et al*. (2019) avaliaram 30 genótipos de feijão no Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e constataram drástico rendimento sob déficit hídrico, embora genótipos como SER-16, SEN-92, FT Paulistinha, Carioca Precoce, IAC Imperador e SXB 410 mostraram maior tolerância.

Com relação a estresse por irradiância excessiva, as plantas são submetidas a fotoinibição e danos oxidativos, isso por conta do excesso de energia que a planta recebe, e favorece uma maior produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) (Mansoor *et al.,* 2022). Nessas condições, há uma grande entrada de elétrons no cloroplasto e os carreadores não dão conta de transportar todos estes elétrons para seus devidos locais de reação, estes ficam no lúmen dos tilacóides, e se ligam ao oxigênio proveniente do processo de fotólise da água.

[1] Incêndios incontroláveis, calor intenso, enchentes pela concentração de chuva em um curto espaço de tempo, estiagens por longos períodos. No Brasil, o Rio Grande do Sul registrou a maior quantia de chuva de todos os tempos, que deixou 184 mortos e 2.398.255 pessoas afetadas de alguma forma, isso de acordo com a Defesa Civil do estado (2025); a Amazônia, Cerrado e o Pantanal sofreram secas severas

Assim, este oxigênio (O_2) passa a ser um superóxido (O_2-), ou seja, a forma reduzida de O_2. Se a planta não tiver enzimas antioxidantes, como por exemplo a superóxidos dismutase (SOD) e catalase (CAT), em uma quantia que proporcione um contrabalanço, ocorrerá a peroxidação lipídica bem como uma disfunção celular, o que leva a planta a senescência (Chauhan *et al*., 2023).

Em cultivo experimental com duas cultivares de feijão ("IAC Imperador", tolerante, e "IAC Milênio"), combinou-se radiação UV-B elevada e seca e o *cv*. Imperador aumentou a quantidade de ceras cuticulares e metabólitos protetores, ajustou a relação raiz parte aérea e demonstrando maior resiliência (Santos *et al*., 2020). Esse é um exemplo de plasticidade fenotípica que a planta pode desenvolver, já que ROS são produzidas continuamente nas células vegetais como subprodutos de processos metabólicos, especialmente da fotossíntese e da respiração. Em concentrações controladas, atuam como moléculas sinalizadoras; entretanto, quando sua produção supera a capacidade dos sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, ocorre estresse oxidativo, que pode causar danos celulares. A eficiência dessas defesas também depende da disponibilidade de substratos, agentes redutores e cofatores necessários à atividade das enzimas antioxidantes (Tripathy; Oelmüller, 2012).

A elevação das temperaturas, seca prolongada bem como o aumento da irradiância são sintomas produzidos pela crise climática, alimentada por processos contínuo de queima de combustíveis fósseis, desmatamento sistemático, superexploração dos bens hídricos e exploração de minérios (Nobre, 2025). Neste cenário de crise climática, a questão agrária deve ser uma faceta a se analisar, porque no Brasil, por exemplo, o sistema produtivo adotado pelo agronegócio, baseada na concentração fundiária e na utilização massiva de tecnologias da Revolução Verde é o grande responsável pelos processos contínuos de devastação dos bens da natureza (Stédile, 2005).

É importante pontuar que o agronegócio tenta matizar a crise climática com falsas "soluções", como o crédito de carbono, que na verdade não altera as práticas que causam efeitos deletérios ao meio ambiente, somente geram mais um negócio lucrativo. Pois, ainda teremos os sintomas, visto que o modo de produção contínua e a produção de alimentos torna-se cada vez mais impossível, assim é necessário cada vez mais tecnologias paliativas que por sua vez gera uma amnésia agrobiocultural; as plantas não conseguem adaptar seu metabolismo a essas mudanças bruscas e repentinas. E ao analisar a cultura do feijão, Berny Mier Y Teran *et al.* (2019), já demostravam grandes preocupação sobre seu cultivo, ao destacar que a duração, a intensidade e o estágio de ocorrência do estresse hídrico, são fatores principais que afetam o rendimento e a qualidade das sementes.

2.5 ANATOMIA VEGETAL

Os vegetais são seres autótrofos, e a folha é o principal órgão fotossintético. Este órgão tem grande importância, pois nele se encontram tecidos fotossintetizantes que realizam a fotossíntese. Na folha, a organização anatômica é bem especializada, como nos demais órgãos, e a sua morfoanatomia é reflexo das condições ambientais na qual está inserida, assim como sua genética (Appezzato-da-Glória; Guerreiro, 2006). A organização anatômica foliar se divide em mesofilo e nervura mediana, tendo acima e abaixo do mesófilo a epiderme.

No mesofilo está inserido o parênquima paliçádico e parênquima lacunoso, estes tecidos que, de forma integrada, regulam processos chaves para a vida, como fotossíntese, trocas gasosas e balanço hídrico (Taiz *et al*., 2017; Terashima *et al*., 2011). Na nervura mediana assim como demais nervuras está inserida tecidos condutores, como xilema e floema, bem como tecidos de preenchimento e sustentação como colênquima e esclerênquima.

A epiderme é formada por células comuns, relacionadas mais a função de proteção e células especializadas como os tricomas e estômatos, além disso, uma característica da epiderme é a presença de cutícula, nas paredes periclinais externas, podendo em algumas espécies também ser ocorrer ceras epicutilulares. O tecido epidérmico, se origina da diferenciação da protoderme, caracterizando sua estrutura, pode-se dizer que as suas células são compactas, achatadas e se organizam na parte superior e inferior dos diferentes órgãos da planta. Ele é um tecido de proteção[2], mas também atua na regulação hídrica e trocas gasosas funções relacionadas a atividade estomática (Lawson; Matthews, 2020; Schreiber, 2010).

2.5.1 Estômato

Os estômatos são estruturas formadas por duas células-guarda e células subsidiárias, constituindo o complexo estomático, fruto da evolução dos vegetais para adaptação ao meio terrestre. Por meio dessas estruturas que a planta realiza as trocas gasosas, ou seja, entrada de dióxido de carbono (CO_2) essencial para fotossíntese e liberação de água por transpiração.

Em relação aos estômatos, a densidade estomática é um dos parâmetros imprescindíveis para compreender a adaptação vegetal às condições ambientais. Esse parâmetro corresponde ao

[2] Tecido de proteção pelo fato de que insetos, fungos e bactérias ao se introduzirem no órgão, a epiderme será a primeira a sofrer o ataque.

número de estômatos presentes por unidade de área foliar, geralmente expressa em estômatos mm^{-2}, sendo importante a análise conjunta com a condutância estomática (Taiz *et al*., 2017; Polania *et al*., 2022).

Ademais, os estômatos possuem arranjos distintos, conforme a espécie vegetal, podendo ser anomocíticos e anisocíticos, caracterizados pela ausência ou diferenciação variável das células subsidiárias ao redor das células-guarda. Outro elemento importante é em relação a posição destas estruturas na lâmina foliar, que caracterizam as folhas em anfistomáticas, hipostomáticas ou epiestomáticas sendo mais comum a concentração dos estômatos na superfície abaxial da folha, em decorrência da menor irradiância (Appezzato-da-Glória; Guerreiro, 2006).

As folhas com maior densidade estomática apresentam maior capacidade de difusão de CO_2 para os tecidos fotossintetizantes, favorecendo elevadas taxas de assimilação de carbono, mas essa condição também pode aumentar a perda de água por transpiração conforme aponta Doheny-adams *et al*. (2012). As pesquisas também demonstram a elevada plasticidade fenotípica dos estômatos, pois folhas de plantas que crescem sob elevada intensidade luminosa apresentam maior densidade estomática, enquanto as de ambiente mais sombreado tendem a apresentar redução da densidade estomática (Medeiros; Lopes, 1993). Estudos de Torres; Rodrigues, (1988 a, b.) corroboram para essa tese, ao demostrarem que diferentes níveis de sombreamento provocados pelo cultivo consorciado com milho modificaram significativamente a densidade estomática de cultivares de feijão com distintos hábitos de crescimento.

2.5.2 Parênquima paliçádico

Os parênquimas paliçádico e esponjoso são os principais centros de produção de energia química da planta, sobretudo o paliçádico, pois os cloroplastos[3] estão em maior densidade. É conveniente destacar que em Perosini, (2025) e Rodrigues, (2018) o paliçádico possui alta sensibilidade as variações de irradiância bem como disponibilidade hídrica, podendo então em alta irradiância, ter o espessamento e formação de mais de uma camada, assim como aumento da densidade de cloroplastos e maior investimento em estruturas como epiderme e cutícula. Já

[3] Os cloroplastos são organelas que possuem estrutura interna especializada, tem em seu interior os tilacóides organizados em grana. Este que vai capturar a energia luminosa e sintetizar ATP e NADPH durante a fase fotoquímica da fotossíntese (Evans; Poorter, 2001; Terashima *et al*., 2011). Destacando que a eficiência desse processo também depende da disponibilidade de nutrientes minerais, principalmente magnésio, pois ele constitui o átomo central da molécula de clorofila; nitrogênio, que é fundamental na síntese de proteínas como a Rubisco, e fósforo, fundamental na formação de ATP e na bicamada fosfolipídica

em ambientes sombreados, há redução do parênquima paliçádico e aumento relativo do parênquima esponjos, favorecendo a difusão de CO_2 e a eficiência na captura de luz.

2.5.3 Parênquima esponjoso

Ao realizar a análise anatômica de forma transversal de uma folha, olhando da face adaxial para a abaxial, logo abaixo do parênquima paliçádico, se insere o parênquima esponjoso. Este por sua vez, possui células de tamanho irregular e disposição frouxa, formando extensos espaços intercelulares que facilitam a difusão de gases no interior da folha, e os espaços são necessários para o transporte de CO_2 (dióxido de carbono) desde os estômatos[4] até os cloroplastos do parênquima paliçádico para realização da fotossíntese (Niinemets, 2009, 2023). Embora apresente menor densidade de cloroplastos, o parênquima esponjoso possui importante atividade metabólica associada à respiração celular, com presença significativa de mitocôndrias e vacúolos envolvidos na regulação osmótica.

A estrutura desse tecido é altamente plástica e responde de forma significativa às condições ambientais, sendo comum a ampliação dos espaços intercelulares em ambientes sombreados e sua redução em condições de déficit hídrico, o que evidencia um mecanismo adaptativo que equilibra a difusão de gases e a conservação de água (Poorter, e*t al*., 2019; Scoffoni; Sack, 2017). Neste contexto, a formação de espaços intercelulares, incluindo cavidades lisógenas, está associada a processos de lise celular programada e desempenha papel importante na dinâmica interna da folha, contribuindo para a circulação de gases e, em alguns casos, para o armazenamento de compostos metabólicos (Taiz *et al*., 2017).

2.5.4 Mesofilo

A integração entre epiderme e mesofilo evidencia que a folha funciona como um sistema coordenado, no qual a captação de luz, a difusão de gases e o controle da perda de água são processos interdependentes. Sob condições de alta irradiância, observa-se o espessamento do parênquima paliçádico, aumento da densidade de cloroplastos e maior produção de estruturas de proteção, como epiderme e cutícula mais desenvolvidas, o que implica maior demanda

[4] É importante reiterar, que os estômatos são estruturas de troca gasosa, que depende principalmente do mineral potássio para que suas células-guarda se contraiam e possibilite entrar e sair gases. A maior densidade de estômatos esta concentrado na face abaxial da folha dos vegetais e poucos na fase adaxial, isto já é um mecanismo de adaptação, pois a maior intensidade de irradiância que a folha recebe é na face adaxial, logo, esta área tende a ter uma temperatura mais elevada. Plantas com características xéricas, que possuem espinhos, por exemplo, o espinho é uma estratégia para que não tenha estômato, e por ter pouca disponibilidade hídrica nestes locais, é necessário ter pouca perca hídrica e gasosa.

energética para manutenção da estrutura (Poorter, *et al*., 2019). Por outro lado, em ambientes sombreados, há redução do parênquima paliçádico e aumento relativo do parênquima esponjoso, favorecendo a difusão de CO_2 e a eficiência na captura de luz difusa (Niinemets, 2009).

Ademais, sob condições de déficit hídrico, as alterações anatômicas tornam-se ainda mais pronunciadas, pois em Brodribb *et al*. (2014); Scoffoni; Sack, (2017) a seca promove compactação do mesofilo, redução dos espaços intercelulares e alterações na estrutura celular que impactam diretamente a difusão de CO_2 e a atividade fotossintética. Logo, essas modificações são estratégia de conservação hídrica; porém acaba implicando em custos metabólicos significativos, já que a manutenção da integridade celular e a biossíntese de estruturas protetivas demandam elevado consumo de ATP.

Nesse sentido, a anatomia foliar deve ser compreendida como expressão material do balanço energético da planta. Pelo fato de que a síntese de ATP e NADPH, concentrada principalmente no parênquima paliçádico (Pao *et al*., 2018), é parcialmente redirecionada, em condições de estresse, para processos de manutenção estrutural e defesa, reduzindo a disponibilidade de energia para o crescimento e para a síntese de compostos de reserva. Essa redistribuição energética estabelece um *trade-off* fundamental entre sobrevivência e produtividade, com implicações diretas na formação de biomassa e no acúmulo de nutrientes nos órgãos de interesse agronômico (Chauhan *et al*., 2023).

Assim, a literatura científica converge para a compreensão de que as mudanças climáticas não apenas afetam processos fisiológicos isolados, mas promovem uma reorganização profunda da anatomia e do metabolismo vegetal. O fato de a redistribuição energética ocorrer, estabelece a compensação fundamental entre sobrevivência e produtividade, com a possibilidade de se tornar cada vez mais comuns esses processos metabólicos, já que está posta a emergência climática e ambiental (Lozano-elena *et al*., 2022; Ribeiro *et al*., 2022).

2.6 A TRANSGENIA EM VEGETAIS

Os organismos geneticamente modificados (OGMs) têm sido amplamente aplicados em campos como a agricultura e a medicina. Diversas metodologias estão disponíveis para a criação desses organismos, sendo uma das mais tradicionais aquela que utiliza como vetor bactérias do gênero *Agrobacterium sp*., comuns no solo, que tem o instinto natural de transferir parte de seu DNA para o genoma de outros seres; nos vegetais, ao transferir, pode causar formações tumorais. A técnica consiste na introdução de um gene de interesse, acompanhado

de um marcador genético, na bactéria, que por sua vez irá transferir esse material para as células vegetais (Ribeiro, 2012).

A técnica de transformação em OGM mais recente adotada, tem sido a tecnologia CRISPR-Cas9, que tem alta precisão, simplicidade de aplicação tanto em laboratório quanto em organismos vivos, e permite edição múltipla nas regiões do DNA ao mesmo tempo (Arend, 2017). A CRISPR-Cas9 foi inspirada nos mecanismos de defesa naturais de algumas bactérias, que conseguem reconhecer e eliminar fragmentos virais inseridos em seu DNA.

No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) tem se destacado na produção de transgênicos desde os anos 1980. Um marco nacional foi o desenvolvimento do feijão OGM resistente ao mosaico dourado. Todos os exemplos demonstram a ampla relevância da transgenia, mas também evidenciam sua complexidade. E no contexto da agricultura, essa tecnologia pode modificar profundamente as cadeias produtivas e impactar de forma significativa os sistemas agroalimentares globais.

Atualmente os OGMs mais cultivados mundialmente estão as variedades Bt, como milho, soja e algodão, que incorporam genes da bactéria *Bacillus thuringiensis* e possuem propriedades inseticidas, ou seja, projetadas para combater sintomas. Desde a liberação comercial da soja geneticamente modificada tolerante ao glifosato em 1998, a adoção de sementes transgênicas tem se expandido rapidamente, promovida por corporações como a Monsanto. E essa expansão associa-se à homogeneização genética dos cultivos, logo, desencadeia o processo de erosão genética atrelada a amnésia agrobiocultural, fenômeno caracterizado pela perda da diversidade de cultivares locais bem como técnicas de cultivo e uso de recursos endógenos (Andrioli, 2008). Segundo Altieri (2017), essa homogeneização torna vulnerável os sistemas agrícolas, intensifica a dependência de insumos externos, diminui a eficiência energética. Seu surgimento está relacionado com o discurso de aumento de produtividade para sanar o problema da fome, mas na verdade são poucas pesquisas transgênicas que estão preocupadas com a melhoria dos alimentos, enquanto a maior parte das pesquisas busca a tolerância das plantas a herbicidas com foco na agroexportação para alimentação da balança comercial (Altieri; Rosset, 1999).

É importante destacar que em 2001 as plantas transgênicas já ocupavam cerca de 54 milhões de hectares de terra no mundo todo (Andrioli, 2008), e em 2018 só o Brasil ocupava essa quantia de área, de acordo com Serviço Internacional para Aquisição de Aplicações em Agrobiotecnologia (ISAAA, 2018). Essas sementes têm gerado debates sobre seus impactos

em várias esferas, desde os aspectos ecológicos até os socioeconômicos e culturais. Entre as discussões mais relevantes, destaca-se a erosão genética provocada pelo processo de homogeneização dos cultivos, acompanhados do uso crescente de agrotóxicos que, por sua vez, como foi alertado por Carson (1962), estes produtos, desde sua chegada na agricultura, começaram a causar efeitos deletérios à saúde ambiental e humana, dados estes reforçados por pesquisas atuais (Freitas; Bombardi, 2018; Panis *et al*., 2022).

Desta forma, com a crescente e desenfreada modificação das sementes, através do processo de melhoramento genético biotecnológico, que visa exclusivamente à produtividade e tolerância ao ataque de pragas, doenças e tolerância a herbicidas, os vegetais vêm apresentando uma grande vulnerabilidade da resistência sistêmica adquirida (RSA) (Kachroo, 2015; Miura *et al*., 2014), ou seja, uma alienação no metabolismo passa a se expressar. Este processo de vulnerabilidade das plantas se deve principalmente ao fato de que, ao introduzir um gene, este pode levar à alteração de outro gene que a planta já possui (Bespalhok *et al*., 2003), ou seja, genes que promovem a RSA podem ser comprometidos. A partir disso, processos como a produção de fitoalexinas e expressão de genes envolvidos na estrutura celular, desencadeadas a partir de estresses bióticos e abióticos, pode comprometer a plasticidade fenotípica dos vetais, o que os torna suscetível aos ataques de agentes nos quais o gene introduzido não possui a capacidade de intervir.

2.6.1 O feijão OGM BRS FC401 RMD

O feijão OGM foi criado pela EMBRAPA em 2011, quando a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio) concedeu a liberação comercial no evento RMD (Embrapa 5.1), lançado em 2019. Importante destacar que essa cultivar OGM não se encaixa no regime alimentar corporativo, principalmente por ser desenvolvido por uma empresa pública, brasileira, e por ser uma tecnologia realmente para melhorar as condições para a produção agrícola e não com intuito de gerar lucro somente. O feijão carioca é consumido majoritariamente no território brasileiro, logo, o feijão BRS FC 401 RMD, não é uma commodity. A cultivar RMD resistente ao vírus do mosaico dourado (*Bean golden mosaic vírus*), é uma tecnologia no qual usou-se estratégia de RNA interferente (RNAi) para inserir um fragmento de DNA derivado do vírus no genoma do feijão. Naturalmente, o feijão, ao ser infectado pelo vírus, produz RNAs de interferência (siRNA), ou seja, uma resposta imune da planta à infecção (Souza *et al*., 2016). Mas, com a rapidez da multiplicação do vírus, a resposta imune da planta é insuficiente. Com essa tecnologia, o vírus trazido pelos insetos, ao se

introduzir na planta, já vai existir nas células vegetais esse gene que interfere no processo de multiplicação viral, o que impede a replicação. Então, é como se planta fosse "vacinada" contra o mosaico dourado. Diferentemente de outros transgênicos existentes, o feijão RMD não está associado à expressão de uma proteína específica. Basicamente um trecho de RNA de fita dupla (dsRNA) é introduzido ou produzido dentro da célula, no qual o RNA é reconhecido pela célula como um alerta e ativam-se mecanismos de defesa. A célula quebra esse RNA em pequenos fragmentos chamados siRNAs (small interfering RNAs). Esses siRNAs se ligam ao RNA mensageiro (mRNA) do gene-alvo, e assim impede que o mRNA seja lido pelos ribossomos e traduzido em proteína. Essas proteínas seriam virais as quais se espalharia pelo citosol da planta e contribuiria com DNA viral para produzir mais partículas (Souza *et al*., 2016; Yang; Li, 2018).

Mas ainda é importante refletir, se essa tecnologia realmente resolve o problema, ou ela procrastina o problema. É conveniente dialogar com pesquisas de Primavesi (2012), que demostra que a base da vida é o solo, que se este estiver mal-nutrido com baixa biodiversidade, vai gerar plantas doentes e seres humanos doentes. Os insetos, as doenças e plantas daninhas são sinalizadores de que algo está errado. Os insetos, por exemplo, possuem normalmente duas enzimas, bactérias uma e fungos até quatro enzimas, que fazem o processo de digestão de substâncias que servem de alimento para eles (Primavesi, 2012). Isso seria micromoléculas, mas eles não podem digerir as macromoléculas. Com isso, uma planta mal-nutrida produzirá substâncias inacabadas, e fica susceptível ao ataque. O real problema de ataque de pragas e doenças nas nossas lavouras é em decorrência de uma má nutrição das plantas, pois o vírus que ataca o feijão só é transmitido por vetores, no caso a mosca-branca (*Bemisia tabaci*).

2.6.2 Aspectos fisiológicos e morfológicos do BRS FC401 RMD

A cultivar BRS FC401 RMD, no qual FC significa "feijão carioca" e RMD "resistente ao mosaico dourado", apresenta ciclo que varia de 85 a 91 dias da germinação até a maturação. O feijão apresenta uma disposição prostrada, com hábito de crescimento indeterminado (tipo III). Além disso, não possui tolerância ao acamamento. Suas flores possuem coloração branca e, na maturação fisiológica, as vagens são amarelo-avermelhadas. Já na maturação de colheita, as vagens têm cor amarela. Os grãos são bege-claros com estrias marron-claras, de forma elíptica semicheia e sem brilho, ficam marrom escuros ao longo do tempo (Souza *et al*., 2016).

2.7 SEMENTES CRIOULAS E AGROBIODIVERSIDADE

As sementes crioulas são conservadas, selecionadas e multiplicadas por agricultores familiares, quilombolas e indígenas, ao longo de gerações. Ter um banco de sementes crioulas, atualmente, só é possível pela resistência destes povos, já que há grandes extensões de monocultivos adjacentes convencionais que embretam as unidades de produção dos povos que cultivam sementes crioulas. Essas sementes apresentam alta variabilidade genética, o que é fundamental para desempenhar um potencial de adaptação a diferentes condições ambientais bem como para a sustentabilidade dos agroecossistemas (Bisneto *et al*., 2022). As sementes crioulas estão regulamentadas na Lei de Sementes 10.711 de 5 de agosto de 2003, "que entre os objetivos é estabelecer um contínuo processo de aquisição de novas sementes básicas ou certificadas, e criar dependência dos detentores do material genético original" (Produtiva; Clim, 2024). No entanto, a Lei também garantiu a criação de dispositivos que reconhecem a existência e o valor das sementes crioulas, o que possibilita a multiplicação, troca, comercialização e uso entre agricultores familiares. A presente lei diz o seguinte, no artigo 2:

> Cultivar local, tradicional ou crioula: variedade desenvolvida, adaptada ou produzida por agricultores familiares, assentados da reforma agrária ou indígenas, com características fenotípicas bem determinadas e reconhecidas pelas respectivas comunidades e que, a critério do Mapa, considerados também os descritores socioculturais e ambientais, não se caracterizem como substancialmente semelhantes às cultivares comerciais (Brasil, 2003).

De acordo com Antunes; Bevilaqua; Eicholz, (2020) sementes crioulas possuem grande valor ecológico e adaptativo, especialmente se cultivadas em sistemas agroecológicos. Esses sistemas promovem a integração entre os ciclos naturais ao realizar o manejo produtivo das espécies; há uma agrobiodiversidade nestes sistemas, isso favorece a conservação dos organismos do ecossistema. Isso permite que os ciclos sejam longos, e eficientes, como o ciclo da água. Neste sentido a agroecologia vem romper o paradigma agrícola industrializado, pois prioriza a agrobiodiversidade nos cultivos, os saberes locais e a sustentabilidade ecológica. Conforme Altieri (2017), sistemas agroecológicos são menos dependentes de insumos externos, mais resilientes a distúrbios ambientais e capazes de preservar a biodiversidade genética e funcional dos cultivos.

Neste sentido, uma lavoura de feijão ou milho crioulo, mesmo que em monocultivo da espécies, possui diversidade genética, enquanto na agricultura industrial, uma lavoura de feijão 'transgênico' com mesmo estande de plantas de uma lavoura de plantas crioulas, vai possuir

indivíduos exatamente idênticos na genética, sendo estes vulneráveis ao agroecossistema (Altieri; Rosset, 1999). Mas a agroecologia através de seus princípios e bases, proporciona o redesenho do sistema produtivo, no qual busca simplificar o mínimo possível os sistema de cultivo, com estratégias como os policultivos, consórcios e agroflorestas. Ela emerge como um anúncio de possibilidade, que podemos conciliar agricultura com biodiversidade sem promover o suicídio ecológico das espécies terrícolas (Caporal, 2009)

Nosso atual sistema produtivo 'industrial', desde a academia os profissionais das ciências agrárias são alienados a aplicar métodos que destroem a natureza, olham em fatores isolados. Mas a natureza deve ser vista como ela é; ela funciona em ciclos, não em fatores isolados. A agroecologia olha o todo, não se preocupa em produzir em escala, mas sim produzir alimentos com alto valor biológico. E a inserção de variedades crioulas em sistemas agroecológicos, sem dúvidas fortalece a soberania alimentar nos territórios locais, além de contribuir para a redução dos impactos causados pelas externalidades da agricultura industrial (Gliessman, 2020). No trabalho realizado por Pinho *et al*. (2024), é expresso dados de ingrediente ativo de agrotóxico, encontrados na água da chuva em comunidades indígenas no estado do Mato Grosso do Sul, que são rodeadas por lavouras adjacentes convencionais, são dados inéditos que mais uma vez reforça que o sistema produtivo adotado pelo agronegócio, com veemência causa efeitos deletérios no ser natureza, e que os agrotóxicos esta no pacote junto com as sementes OGMs.

A valorização dessas variedades crioulas, aliada a práticas de manejo sustentável, é uma estratégia eficaz para enfrentar a erosão genética e a crise ambiental global e ter sustentabilidade a longo prazo, tendo em vista a baixa necessidade de insumos. Pois, os estudos apontam que o cultivo de variedades crioulas, favorece uma menor dependência de insumos externos, especialmente os energéticos, em comparação com as cultivares transgênicas ou híbridas, que frequentemente demandam maior uso de fertilizantes, agrotóxicos e maquinários pesados (Altieri, 2004). Ou seja, uma dependência de tecnologia que remedeiam sintomas e não tratam o real problema, são paliativas.

Trabalhos realizados por Primavesi (2012) reforça que a eficiência energética é um dos pilares da agricultura ecológica sustentável e que as práticas agroecológicas, ao promoverem a biodiversidade e a saúde do solo, contribuem para a redução do uso de insumos externos, isso resulta em uma agricultura mais econômica e menos dependente de energia externa. Além disso, a partir de princípios e bases da agroecologia, é possível promover a ciclagem de nutrientes e a regeneração do solo, o que diminui a necessidade de fertilizantes

sintéticos e do uso intensivo de energia para a preparação da terra (Gliessman, 2007). Tais práticas são um reflexo de uma abordagem holística, que busca aumentar a resiliência do sistema agrícola e otimizar o uso de recursos naturais de forma mais eficiente, e garantir a interação entre ser humano e natureza, fazendo este se reconhecer como natureza, e entender que ao transformá-la, ele também se transforma, e que esta não o castiga, mas ele próprio se castiga ao fazer agricultura com fatores isolados e ter a natureza como um apêndice que serve para extrair bens e acumular lucro.

As cultivares melhoradas geneticamente pelo ser humano são desenvolvidas para atender a demandas de produtividade em larga escala. Geram maiores rendimentos por hectare, frequentemente exigem maiores investimentos em insumos energéticos, como fertilizantes e pesticidas, que aumenta o consumo energético no cultivo (Gliessman, 2007; Primavesi, 2012). Esse modelo de produção, ao priorizar a alta produtividade em detrimento da sustentabilidade, torna os agroecossistemas perturbados, no qual uso de energia externa é desproporcional à produção.

Dada a emergência climática, causada pela ruptura dos ciclos biogeoquímicos, a partir da hegemonia depredatória do sistema da agricultura industrial, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com as sementes crioulas, que busca mostrar sua eficiência adaptativa a estreses abióticos. Trabalhos realizados recentemente por Khoury *et al*. (2022); Santiago *et al*. (2022); De, (2024); Arenas *et al*. (2024), apresentam resultados promissores de estratégias e adaptações de variedades crioulas de diferentes espécies que compõe a agrobiodiversidade nos territórios tradicionais, com relação aos aspectos climáticos intensificados nos últimos períodos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, a pesquisa foi conduzida com base em métodos quantitativos e qualitativos, ao utilizar abordagens descritas em estudos já desenvolvidos. As variáveis analisadas na anatomia foliar foram espessura do mesofilo, do parênquima paliçádico e do parênquima esponjoso, bem como a densidade estomática dos genótipos crioulo e OGM de feijão sob resposta ao déficit hídrico e irradiância.

O experimento foi desenvolvido na casa de vegetação do Instituto Educar, localizado, em Pontão RS-324, Zona Rural, Pontão (28º 03’30’’ S; 52º 43’26’’ W), nos laboratórios de Entomologia e Bioquímica da Universidade Federal da Fronteira Sul Campus Erechim e Laboratório de Microscopia da UFFS, *campus* Cerro Largo. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, em esquema trifatorial 2 × 2 × 2, com quatro repetições por tratamento, perfazendo um total de 32 unidades experimentais.

3.1 SELEÇÃO DAS CULTIVARES E ESTÁDIOS FENOLÓGICOS

As sementes de feijão crioulo foram obtidas de um agricultor familiar do assentamento Tamakavi, localizado no município de Itaquiraí, Mato Grosso do Sul. O acesso a esse material encontra-se registrado no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado (SisGen), sob o cadastro nº A66CDDE. As sementes de feijão transgênico (OGM) foram fornecidas pela Embrapa Arroz e Feijão. Os materiais avaliados corresponderam à variedade crioula Carioquinha e a cultivar transgênica BRS FC 401 RMD.

3.2 CULTIVO EM CASA DE VEGETAÇÃO

A casa de vegetação possui orientação sul e recebe irradiância solar durante a maior parte do dia. O cultivo das plantas foi realizado em vasos com capacidade de 3 L, preenchidos com substrato composto por uma mistura de solo e areia na proporção de 1:1 (v/v). O solo foi coletado em área não antropizada nas dependências do Instituto Educar, o qual foi peneirado e posteriormente encaminhado para a análise química. Os resultados da análise química estão ilustrados na tabela 1 (pH, matéria orgânica, CTC, macro e micronutrientes). Foram semeadas cinco sementes por vaso. Aos 12 dias após a semeadura (DAS), realizou-se o desbaste, mantendo-se apenas uma plântula por unidade experimental, escolhida com base na uniformidade morfológica.

Tabela 1 – Análise química e física de solo

Amostras	Teor de Argila	pH em	Índice	P	K	M.O.	Al
	%	H_2O	SMP	mg/dm³	mg/dm	%	$Cmol_c/dm^3$
1-I.E	41	6,0	5,8	34,7	316	3,7	0,0

Amostra	Ca	Mg	Saturações				
	$Cmol_c/dm^3$	$Cmol_c/dm^3$	Bases	Alumínio	Cálcio	Magnésio	Potássio
			%				
2-I.E	7,2	2,9	67	0	44	18	5

Amostra	H+Al	$CTC_{pH\ 7,0}$	S	Zn	Cu	Mn	B
	$Cmol_c/dm^3$	$Cmol_c/dm^3$	mg/dm³	mg/dm³	mg/dm³	mg/dm³	mg/dm³
3-I.E	5,5	16,4	26,3	5,0	3,0	3,3	0,5

Resultados obtidos após secagem das amostras de solo à 65ºC. Metodologia conforme descrito em Tedesco *et al*. (1995). Ensaio/Método: Argila = Densímetro. P, K, Zn, Cu = Mehlich-I. Ca, Mg, Mn, Al = KCl 1,0 mol/L. S, B = colorimetria. Matéria Orgânica (M.O.) = oxidação sulfocrômica. Saturação por Bases = Ca+Mg+K .

Fonte: Universidade de Passo Fundo (2025).

3.3 TRATAMENTOS

Foram avaliados oito tratamentos, resultantes da combinação dos fatores sombreamento (S), déficit hídrico (DH) e genótipos de feijão (Crioulo e OGM). Os tratamentos foram constituídos da seguinte forma: T1 (Crioula + DH + S); T2 (Crioula + DH + sem S); T3 (Crioula + sem DH + S); T4 (Crioula + sem DH + sem S); T5 (OGM + DH + S); T6 (OGM + DH + sem S); T7 (OGM + sem DH + S); e T8 (OGM + sem DH + sem S). O arranjo experimental está apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Arranjo do experimento.



Fonte: Autor (2026).

3.3.1 Sombreamento

Para a aplicação do sombreamento foi adaptada a metologia descrita por Hungria *et al.* (2014), Gong *et al.* (2022) e Nardini *et al*. (2025). O tratamento consistiu na instalação de uma tela preta com 50% de sombreamento no interior da casa de vegetação, posicionada a aproximadamente 1,5 m acima do dossel das plantas e com aberturas laterais que permitiram a circulação de ar e a ventilação do ambiente. O sombreamento foi mantido desde a semeadura até o final do período experimental.

O arranjo das unidades experimentais foi organizado em blocos adaptados em função da aplicação do tratamento de sombreamento. Para evitar a interferência entre os tratamentos com e sem sombra, os vasos foram distribuídos em dois grandes blocos dispostos verticalmente no interior da casa de vegetação, correspondendo às condições de sombreamento e pleno sol, vale salientar que mesmo ficando dois grandes blocos, existe a organização de quatro blocos, todavia, arranjados de forma vertical para evitar sobreposição de sombreamento da estrutura. Em cada bloco foram alocadas duas repetições de cada tratamento, totalizando as quatro repetições previstas no delineamento experimental

Essa disposição foi necessária porque o sombreamento foi aplicado por meio de uma estrutura coletiva, não sendo possível instalar telas individualmente em cada unidade experimental. Dessa forma, foram estabelecidas duas condições de luminosidade (com e sem sombreamento), combinadas com duas condições hídricas (com e sem déficit hídrico) e dois genótipos de feijão (crioulo e OGM).

3.3.2 Déficit hídrico

Para aplicação do déficit hídrico, utilizou-se a metodologia descrita em Santiago; Cargnelutti; Castamam (2022). Nesse método, a capacidade de campo (CC) é determinada a partir da massa do solo saturado por ascensão capilar acrescida da massa do vaso. Foram estabelecidos dois níveis de disponibilidade hídrica: 70% da capacidade de campo, utilizado como tratamento controle, e 50% da capacidade de campo, caracterizado como condição de déficit hídrico severo.

Para a determinação da capacidade de campo, foram adicionados 3 kg de substrato em cada vaso. Em seguida, os vasos foram mantidos imersos em água por 24 horas, permitindo a saturação do substrato por ação capilar. Após esse período, os vasos foram pesados, sendo essa massa considerada correspondente a 100% da capacidade de campo. A partir desse valor, foram calculadas as quantidades de água necessárias para a manutenção dos tratamentos em 50% e 70% da capacidade de campo.

Durante o período experimental, vasos sem plantas foram pesados a cada dois dias para estimar as perdas de água por evaporação. Com base na massa previamente conhecida dos vasos com e sem plantas, foi determinada a reposição hídrica necessária para manter os níveis de umidade estabelecidos em cada tratamento.

O déficit hídrico foi iniciado na fase vegetativa inicial V3[5] e mantido até a fase reprodutiva R7, caracterizada pelo início da formação das vagens, conforme adaptação da metodologia descrita por de Lanna *et al*. (2016).

3.4 DETERMINAÇÕES ANATÔMICAS E DENSIDADE DE ESTÔMATOS

As coletas de folhas foram realizadas na fase R7 da cultura do feijão. Para garantir a padronização das amostras, foi coletado um folíolo por planta, selecionado na região abaixo do terceiro nó contado a partir do meristema apical.

Para a análise da densidade estomática, foram utilizadas seções de 1 cm² retiradas da região mediana da lâmina foliar de cada folíolo, abrangendo as faces da epidermes adaxial e abaxial. A confecção das lâminas foi realizada por meio da técnica de impressão epidérmica com adesivo à base de éster de cianoacrilato (Super Bonder®), conforme descrito por Torres; Rodrigues, (1988 a). Para a quantificação dos estômatos, foi utilizada uma adaptação da metodologia proposta por Zoulias *et al*. (2020). As impressões epidérmicas foram fotografadas em microscópio óptico com aumento de 400×, e as contagens e medições foram realizadas com auxílio do software ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, EUA). A densidade estomática (%) foi determinada a partir do número total de estômatos por unidade de área (estômatos mm^{-2}), considerando-se um campo de visão de 0,0254 mm² obtido no microscópio Olympus CX21.

Para a análise anatômica do mesofilo, antes de realizar a impressão da epiderme do folíolo, foram obtidos cortes transversais da região mediana dos folíolos. Inicialmente, foi retirado um segmento de aproximadamente 1 cm de comprimento da porção central da lâmina foliar, removendo-se as margens e mantendo-se a nervura central e o mesofilo adjacente. As amostras foram fixadas em glutaraldeído 1% e formaldeído 4% (Mcdowell; Trump, 1976), preparada em tampão fosfato de sódio (0,1 M, pH 7,2). Em seguida, foram desidratadas em série etílica crescente e incluídas em hidroxietilmetacrilato (Gerrits; Smid, 1983). Posteriormente, as amostras foram seccionadas (5 μm) em micrótomo rotativo (Lupetec® MRP20016) com navalha descartável de aço. Como corante utilizou-se Azul de Toluidina (O'brien; Mccully, 1981). As análises e registro das imagens foram realizadas em microscópio de campo claro (Olympus® BX53), com câmera digital acoplada, registrando duas imagens por

[5] Abertura da primeira folha composta trifoliada.

repetições em um aumento de 400 X. As imagens fotografadas, estão a 600 µm da nervura central.

A quantificação celular foi realizada com o auxílio do software ImageJ, com adaptações dos métodos descritos em trabalhos de Castillo; Juan, (2025); Oliveira *et al*. (2023); Rodrigues, (2018); Wuyts *et al*. (2010). A contagem das camadas dos parênquimas paliçádico e esponjosos foi realizada com base na morfologia celular. Células alongadas e organizadas em paliçada, adjacentes a face adaxial, foram classificadas como pertencentes ao parênquima paliçádico, enquanto células de formato irregular ou aproximadamente circular, adjacentes a face abaxial da epiderme, foram consideradas pertencentes ao parênquima esponjoso.

As medições da altura celular, da área da célula e da quantidade de células do parênquima paliçádico foram realizadas em dois campos de visão aleatoriamente selecionados, cada um com extensão linear de 100 µm. Para quantificação do número de células, da área celular e área dos espaços intercelulares do parênquima esponjoso, foram analisados dois campos de visão por imagem, cada um com uma área de 2.500 µm², por imagem, devido à disposição irregular das células nesse tecido. A espessura total do mesofilo foi determinada em três campos de visão por imagem. Após a obtenção das medidas, foram calculadas as médias das variáveis analisadas, as quais foram posteriormente submetidas às análises estatísticas.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

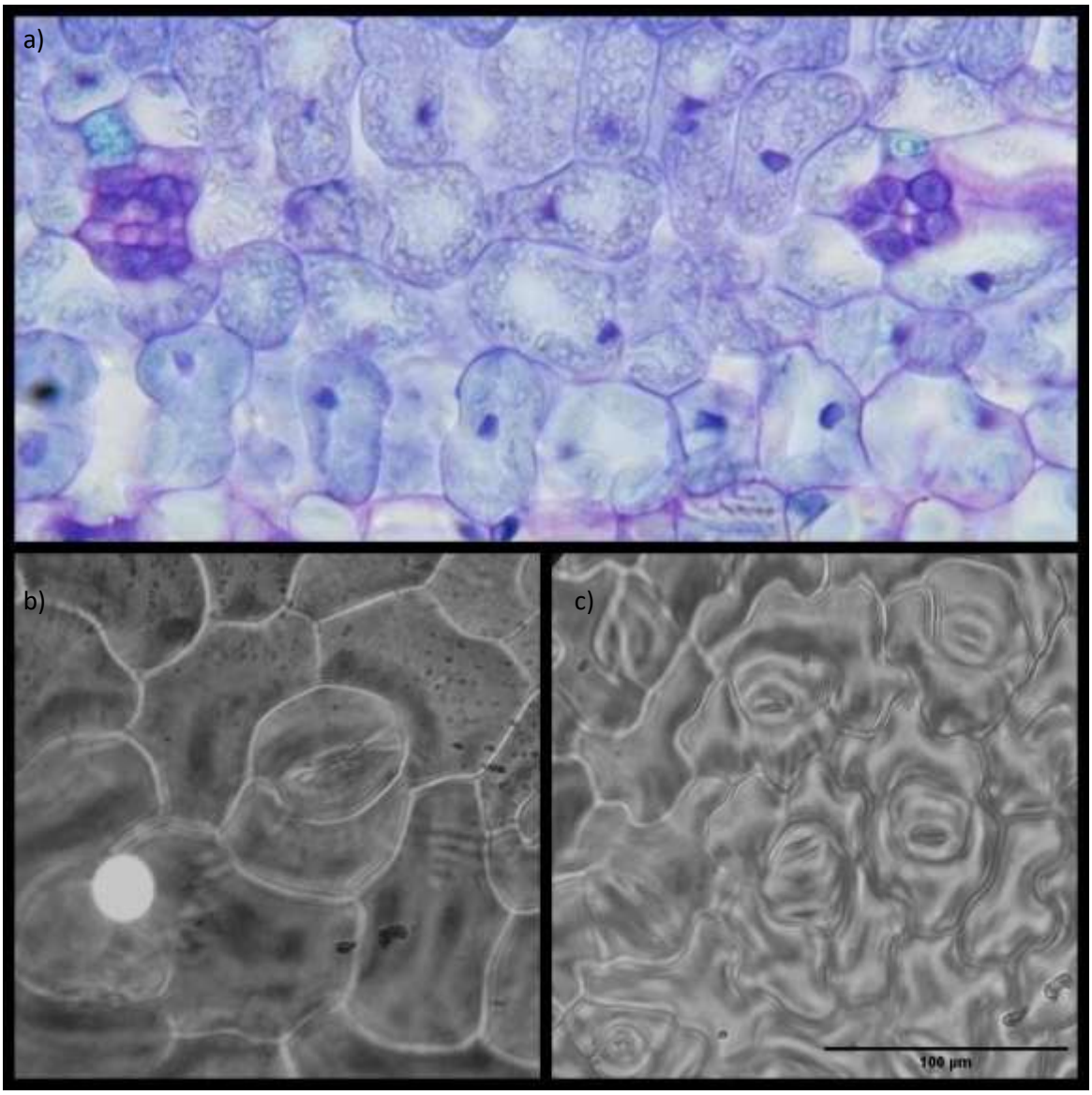
Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística utilizando o software R. Inicialmente, realizou-se a análise de variância (ANOVA) por meio do teste *F*, considerando o delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 2 × 2 × 2. Quando observadas interações significativas entre os fatores ou efeitos significativos dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de *Tukey* a 5% de probabilidade de erro ($p \leq 0,05$), a 1% ($p \leq 0,01$) utilizando os pacotes *emmeans*, *agricolae*, *multcomp* e *multcompView*. A organização dos dados foi realizada com auxílio do pacote *readxl*, e as Figuras e tabelas dos resultados foram elaborados no ambiente R.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARÊNQUIMA LACUNOSO, MESOFILO E DENSIDADE ESTOMÁTICA

As lâminas foliares dos genótipos de feijão apresentaram estômatos do tipo anisocítico na fase adaxial e anomocítico na face abaxial. O mesofilo mostrou-se dorsiventral, constituído por parênquima paliçádico voltado para a face adaxial e parênquima esponjoso voltado para a face abaxial (Figura 2), conforme destaca Martinez, (1999); Sousa; Ilkiu-borges; Santana, (2011); Vinicius; Lima; Schwartz, (2008).

Figura 2 – Características anatômicas da folha de *Phaseolus vulgaris* L. submetidas a condições de déficit hídrico e/ou sombreamento. (a) células do parênquima esponjoso em corte transversal; (b) estômatos da face adaxial da epiderme; e (c) estômatos da face abaxial da epiderme.



Fonte: Autor (2026).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância (ANOVA), com quadrados médios e significância dos fatores déficit hídrico, sombreamento e genótipo, bem como de suas interações, para as variáveis área dos espaços intercelulares do parênquima esponjoso (PE_Ar), número de camadas do parênquima esponjoso (PE_Cam), espessura do mesófilo, densidade estomática abaxial (DEAB) e densidade estomática adaxial (DEAD).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios				
		PE_Ar	PE_Cam	Mesofilo	DEAB	DEAD
Blocos	3	1.487^{ns}	$0{,}0495^{ns}$	$872{,}2^{ns}$	$35{,}650^{ns}$	$5.877{,}1^{ns}$
Déficit hídrico (D)	1	38.406^{ns}	$1{,}3203^{ns}$	$4.115{,}8^{**}$	0^{ns}	$1.743{,}6^{ns}$
Genótipo (G)	1	563^{ns}	$1{,}7578^{ns}$	$658{,}6^{ns}$	$55{,}994^{ns}$	$4.843{,}5^{ns}$
Sombreamento (S)	1	25.707^{ns}	$0{,}6328^{ns}$	$2.611{,}5^{*}$	$4{,}844^{ns}$	$6.975{,}0^{ns}$
D × G	1	62.493^{ns}	$0{,}0078^{ns}$	$819{,}3^{ns}$	$15{,}694^{ns}$	$9.493{,}4^{ns}$
D × S	1	62.327^{ns}	$0{,}3828^{ns}$	$113{,}2^{ns}$	$325{,}694^{**}$	0^{ns}
G × S	1	12.053^{ns}	$3{,}4453^{**}$	$16{,}4^{ns}$	$111{,}600^{ns}$	$27.900{,}0^{**}$
D × G × S	1	4.005^{ns}	$1{,}3203^{ns}$	$71{,}3^{ns}$	$12{,}400^{ns}$	$775{,}0^{ns}$
Resíduo	21	34.191	0,4066	396,4	39,488	2.814,0
Média geral		**393,93**	**4,08**	**167,83**	**674,21**	**105,81**
CV (%)		**43,92**	**18,45**	**14,88**	**32,22**	**60,84**

D = déficit hídrico; G = genótipo; S = sombreamento; ns = não significativo; * $p \leq 0{,}05$; ** $p \leq 0{,}01$; *** $p \leq 0{,}001$, pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

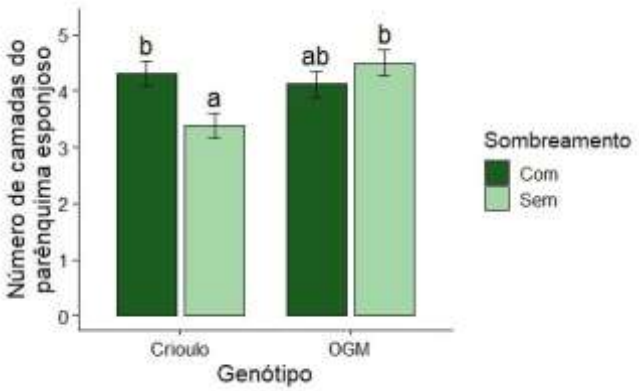
4.1.1 Parênquima esponjoso

A análise de variância indicou interação significativa entre genótipo e sombreamento para o número de camadas de parênquima esponjoso ($p < 0{,}01$; Tabela 2). Esse resultado demonstra que a resposta anatômica desse tecido em feijão depende da interação entre o genótipo e a disponibilidade de luz. O genótipo Crioulo apresentou, sob sombreamento, um número de camadas de parênquima esponjoso 26,5% superior ao observado em plantas cultivadas sem sombra.

Por outro lado, o genótipo OGM não apresentou diferenças significativas entre as condições de cultivo. Na ausência de sombreamento, o OGM apresentou número de camadas 32,4% superior ao do genótipo Crioulo, enquanto sob sombreamento não foram observadas diferenças estatísticas entre os genótipos. Esses resultados sugerem que o genótipo Crioulo apresenta maior plasticidade anatômica em resposta à redução da irradiância, aumentando o desenvolvimento do parênquima esponjoso em ambientes sombreados. Segundo Niinemets (2009), modificações na estrutura do mesofilo constituem importantes mecanismos de aclimatação à disponibilidade luminosa, podendo favorecer a difusão interna de CO_2 e otimizar o desempenho fotossintético em condições de menor intensidade de luz. Salientando que em

novos estudos torna-se necessário, em conjunto com as análises realizadas, a medição da difusão de CO_2.

Figura 3 – Número de camadas do parênquima esponjoso em genótipos de *Phaseolus vulgaris* L. cultivados com e sem sombreamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,01$).



Fonte: Autor (2026).

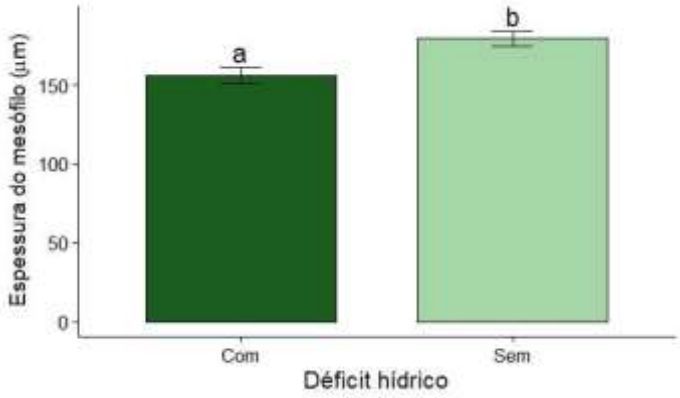
Cabe ressaltar que o parênquima esponjoso exerce papel fundamental no transporte interno de gases, especialmente do CO_2 proveniente dos estômatos até os cloroplastos localizados predominantemente no parênquima paliçádico. E como descrito por Niinemets, (2023) maiores espaços intercelulares reduzem a resistência à difusão do carbono e tendem a favorecer a manutenção da atividade fotossintética em ambientes com limitação luminosa, favorecendo o procede ricocheteamento da luz difusa, tendo uma maximização da luz. Logo, a interação observada indica que os genótipos avaliados apresentam diferenças na plasticidade fenotípica, que representa um importante mecanismo de aclimatação.

4.1.2 Mesofilo

Com relação à espessura do mesofilo, foram observados efeitos significativos do déficit hídrico ($p < 0,01$) e do sombreamento ($p < 0,05$), enquanto os genótipos não apresentaram influência significativa sobre essa variável (Tabela 2). As plantas cultivadas sem déficit hídrico apresentaram espessura do mesofilo aproximadamente 14,1% maior em comparação às submetidas à restrição hídrica (Figura 4). Esse resultado evidencia que a disponibilidade hídrica exerce papel importante na manutenção da estrutura foliar, uma vez que o déficit hídrico pode limitar a expansão celular e reduzir o desenvolvimento dos tecidos do mesofilo (Javornik; Carovi, 2025). Além disso, observou-se comportamento semelhante em relação ao

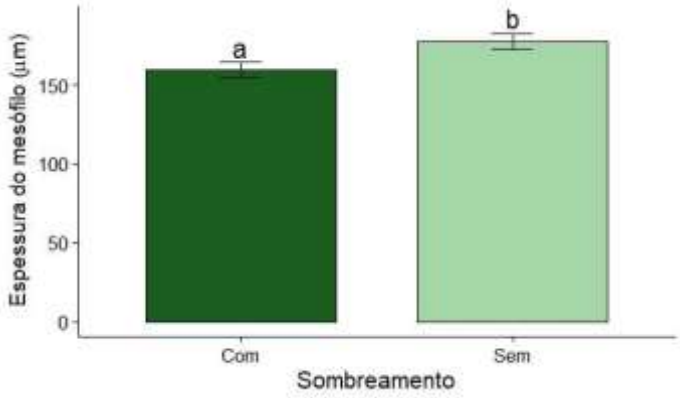
sombreamento, no qual as folhas de plantas cultivadas sem sombra apresentaram maior espessura do mesofilo quando comparadas às cultivadas sob sombreamento (Figura 5).

Figura 4– Espessura do mesofilo em folhas de *Phaseolus vulgaris* L. cultivadas com e sem déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$).



Fonte: Autor (2026).

Figura 5 – Espessura do mesofilo em folhas de *Phaseolus vulgaris* L. cultivadas com e sem sombreamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,01$).



Fonte: Autor (2026).

Plantas cultivadas sob adequada disponibilidade hídrica apresentaram maior espessura do mesofilo em comparação àquelas submetidas ao déficit hídrico (Javornik; Carovi, 2025; Terashima *et al*., 2006). De forma semelhante, plantas cultivadas sem sombreamento apresentaram mesofilo mais espesso em relação às cultivadas sob redução da irradiância (Evans; Poorter, 2001; Terashima *et al*., 2006, 2011). A diminuição da espessura do mesofilo em condições de déficit hídrico pode estar associada à redução do turgor celular, limitando a

expansão e o crescimento das células dos tecidos foliares (Javornik; Carovi, 2025). Por sua vez, a menor espessura observada em ambientes sombreados representa uma resposta adaptativa à baixa disponibilidade de luz, resultando em folhas mais delgadas e com menor investimento estrutural (Niinemets, 2009; Poorter, H, *et al*., 2019). Essas modificações anatômicas constituem mecanismos de aclimatação que permitem à planta ajustar sua estrutura foliar às condições ambientais predominantes. Conforme discutido por Brodribb *et al*. (2014); Niinemets, (2009, 2023); Scoffoni; Sack, (2017) a deficiência hídrica promove a compactação dos tecidos foliares, reduz a expansão celular e diminui os espaços intercelulares, resultando em folhas mais delgadas. Embora os resultados do presente estudo demonstraram que o sombreamento favoreceu o aumento do número de camadas do parênquima esponjoso (Figura 1), independentemente do genótipo, observou-se redução da espessura total do mesofilo sob essa condição. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que o mesofilo é constituído tanto pelo parênquima paliçádico quanto pelo parênquima esponjoso, de modo que alterações na espessura e no desenvolvimento do parênquima paliçádico podem exercer maior influência sobre a espessura final da folha do que o aumento no número de camadas do tecido esponjoso (Poorter, H, *et al*., 2019; Terashima *et al*., 2006, 2011). Além disso, folhas desenvolvidas sob baixa irradiância tendem a apresentar células menores e tecidos menos espessos, caracterizando uma estratégia de aclimatação que reduz o investimento estrutural e maximiza a captura da luz disponível, salientando que não é uma regra, pois deve-se levar em consideração o genótipo também, que pode provocar influências, bem como a espécie do vegetal (Evans; Poorter, 2001).

Essas alterações anatômicas podem ser explicadas por mecanismos fisiológicos associados ao déficit hídrico. A escassez de água induz o fechamento estomático, processo mediado principalmente pelo ácido abscísico (ABA), reduzindo a entrada de CO_2 nos espaços intercelulares da folha (Taiz *et al*., 2017; Lawson; Matthews, 2020; Javornik; Carovi, 2025). Simultaneamente, a compactação dos tecidos foliares aumenta a resistência à difusão interna desse gás em direção aos cloroplastos. Como consequência, ocorre diminuição da disponibilidade de CO_2 nos sítios de carboxilação, comprometendo a atividade fotossintética (Martinez, 1999). Nessas condições, a Rubisco, enzima responsável pela carboxilação da ribulose-1,5-bifosfato (RuBP) durante o ciclo de Calvin, passa a operar sob menor disponibilidade de substrato, reduzindo a assimilação de carbono e, consequentemente, a síntese de carboidratos necessários para a expansão, diferenciação e manutenção dos tecidos foliares (Chaves; Flexas; Pinheiro, 2009; Flexas, 2013). Dessa forma, a redução da espessura do mesofilo observada em plantas submetidas ao déficit hídrico pode ser atribuída à menor

disponibilidade de fotoassimilados e à limitação do crescimento celular (Chauhan *et al*., 2023; Pao *et al*., 2018).

A menor espessura do mesofilo observada sob sombreamento corrobora com os resultados descritos por Evans; Poorter, (2001); Terashima *et al*. (2006, 2011), que relatam que a redução da irradiância diminui a necessidade de investimento em tecidos fotossintéticos espessos, especialmente no parênquima paliçádico. Em ambientes com baixa disponibilidade de luz, a produção de folhas mais finas representa uma estratégia adaptativa eficiente, pois reduz o custo energético associado à formação e manutenção dos tecidos foliares. Nessa condição, o ganho fotossintético obtido pelo aumento da espessura da folha não compensa o investimento metabólico necessário para sua construção.

Esses resultados evidenciam a elevada plasticidade fenotípica de *Phaseolus vulgaris* L. frente às variações ambientais, permitindo o ajuste da estrutura foliar às condições predominantes de cultivo. Em ambientes com maior irradiância, o desenvolvimento de um mesofilo mais espesso, especialmente pelo maior investimento no parênquima paliçádico, favorece a interceptação da luz e a distribuição dos cloroplastos ao longo do tecido fotossintético (Terashima *et al*., 2011). Consequentemente, há maior potencial para a produção de ATP e NADPH nas reações fotoquímicas, sustentando taxas mais elevadas de assimilação de carbono (Evans; Poorter, 2001; Terashima *et al*., 2006). Em contraste, sob sombreamento, a redução da espessura foliar representa uma estratégia de economia de recursos, permitindo que a planta maximize a eficiência do uso da luz disponível sem incorrer em custos estruturais desnecessários (Poorter, H, *et al*., 2019).

4.1.3 Densidade estomática

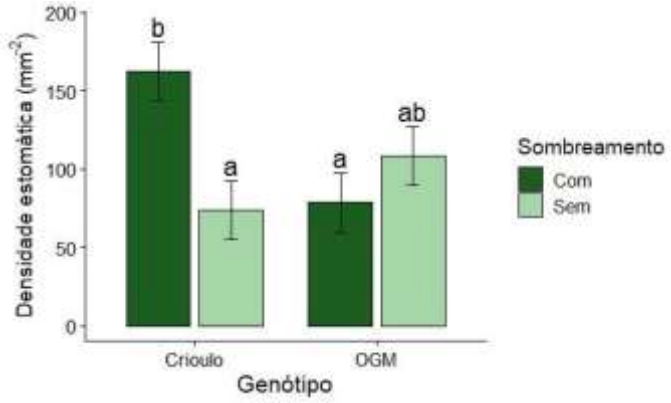
4.1.3.1 Densidade estomática adaxial

A densidade estomática da face adaxial da epiderme foi influenciada pela interação entre genótipo e sombreamento ($p < 0,01$), demonstrando que a resposta dessa característica depende da combinação entre o material genético e a disponibilidade de luz. O genótipo Crioulo cultivado sob sombreamento apresentou a maior densidade estomática, sendo aproximadamente 118,9% superior à observada no mesmo genótipo cultivado sem sombra. Além disso, sob sombreamento, o genótipo Crioulo apresentou densidade estomática cerca de

105,1% superior à do genótipo OGM submetido à mesma condição. Por outro lado, o genótipo Crioulo cultivado sem sombreamento não diferiu estatisticamente do OGM, independentemente da condição de irradiância. Da mesma forma, o genótipo OGM não apresentou diferenças significativas entre os ambientes de cultivo (Figura 6).

Esses resultados indicam que o genótipo Crioulo apresenta maior plasticidade anatômica em resposta à redução da irradiância, ajustando a densidade estomática da face adaxial de acordo com as condições ambientais. Alterações na densidade estomática constituem importantes mecanismos de aclimatação, pois influenciam diretamente as trocas gasosas e o balanço hídrico da planta (Doheny-adams *et al*., 2012; Zoulias *et al*., 2020). Embora ambientes sombreados geralmente reduzam a demanda evaporativa, o aumento da densidade estomática pode representar uma estratégia para otimizar a difusão de CO_2 e maximizar a eficiência fotossintética em condições de menor disponibilidade luminosa (Harrison e*t al*., 2020; Lawson; Matthews, 2020; Niinemets, 2009). Salientando que associada a densidade estomática, para conclusões contundentes em proximas pesquisas torna-se necessário a análise da condutância estomática.

Figura 6 - Densidade estomática adaxial em genótipos de *Phaseolus vulgaris* L. cultivados com e sem sombreamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$).



Fonte: Autor (2026).

Os resultados observados no presente estudo contrastam com os reportados por Medeiros; Lopes, (1993); Torres; Rodrigues, (1988) os quais verificaram menor densidade estomática na face adaxial de folhas desenvolvidas sob sombreamento em comparação aquelas cultivadas sob maior disponibilidade de luz. Entretanto, o aumento da densidade estomática adaxial observado no genótipo Crioulo sob sombreamento pode representar uma estratégia compensatória para maximizar a difusão de CO_2 em um ambiente caracterizado pela menor disponibilidade de energia luminosa. Segundo (Niinemets, 2009) em condições de baixa

irradiância, a limitação da fotossíntese está associada principalmente à menor produção de ATP e NADPH durante a fase fotoquímica, pois não há regeneração da RuBP. Dessa forma, o aumento da densidade estomática pode contribuir para otimizar o suprimento de CO_2 aos tecidos fotossintéticos, atuando conjuntamente com as modificações observadas na arquitetura do mesofilo e favorecendo a manutenção da eficiência fotossintética em condições limitantes de luz (Terashima *et al*., 2011).

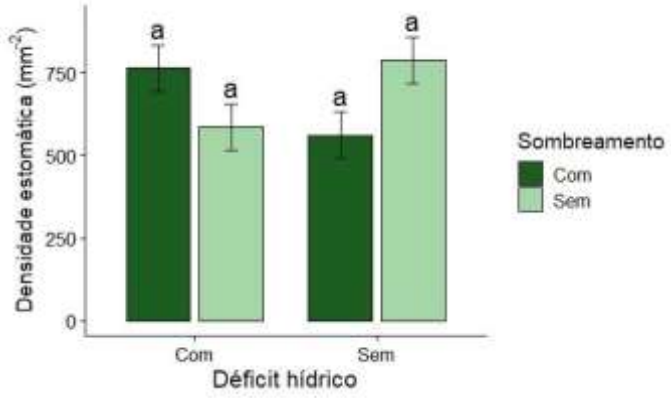
Por outro lado, em ambientes com elevada irradiância, a quantidade de energia absorvida pelos fotossistemas pode exceder a capacidade de utilização pelos processos bioquímicos da fotossíntese. Quando a assimilação de carbono não acompanha a excitação fotoquímica, ocorre o acúmulo de elétrons na cadeia transportadora, favorecendo a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio singlete ($^1O_2$) (Mansoor *et al*., 2022). Nessas condições, as plantas enfrentam um importante dilema fisiológico entre maximizar a entrada de CO_2 e minimizar a perda de água. Embora uma maior densidade estomática possa favorecer a difusão de CO_2 e reduzir o risco de fotoinibição, ela também aumenta o potencial de transpiração (Doheny-adams *et al*., 2012). Assim, a menor densidade estomática adaxial observada sob pleno sol pode representar um mecanismo adaptativo destinado a restringir a perda hídrica excessiva, contribuindo para a manutenção do balanço hídrico e para a proteção dos tecidos foliares frente às condições de maior demanda evaporativa (Lawson; Matthews, 2020). Todavia, uma hipótese é que ao ter uma densidade reduzida, e haver menor difusão do CO_2 a RUBISCO pode passar a operar em oxigenase, iniciando o processo de fotorrespiração, que por sua vez pode ser uma forma de evitar fotodanos por ROS, mas tem alto gasto energético. Nesta hipótese, observase que o vegetal opta por ter um gasto energético alto, para evitar sua morte por por processos oxidativos.

4.1.3.2 Densidade estomática abaxial

Com relação à densidade estomática da face abaxial, verificou-se interação significativa entre déficit hídrico e sombreamento ($p < 0,01$), indicando que a resposta dessa característica depende da combinação entre a disponibilidade hídrica e a irradiância (Tabela 2). Entretanto, o teste de comparação de médias não evidenciou diferenças estatísticas entre as combinações dos tratamentos avaliados, uma vez que todos os tratamentos foram agrupados em uma mesma classe estatística (Figura 7). Embora não tenham sido detectadas diferenças significativas, observa-se uma tendência de resposta contrastante entre os fatores, caracterizada por alterações na densidade estomática em função da combinação entre déficit hídrico e sombreamento. Esses

resultados sugerem que a densidade estomática da face abaxial apresenta relativa estabilidade frente às condições ambientais avaliadas, sendo menos sensível às variações de disponibilidade hídrica e irradiância do que a densidade estomática da face adaxial.

Figura 7 - Densidade estomática abaxial em folhas de *Phaseolus vulgaris* L. cultivadas sob condições de déficit hídrico e sombreamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,01$).



Fonte: Autor (2026).

Apesar da ausência de diferenças significativas entre as médias, a interação detectada pela análise de variância indica que a densidade estomática da face abaxial responde à combinação entre disponibilidade hídrica e irradiância em ambos os genótipos em estudo. Essa resposta é relevante, pois a maior parte dos estômatos de *P. vulgaris* encontra-se concentrada na superfície abaxial, característica considerada uma adaptação que reduz as perdas de água sem comprometer significativamente as trocas gasosas (Medeiros; Lopes, 1993; Torres; Rodrigues, 1988). Assim, mesmo pequenas variações nessa característica podem representar ajustes fisiológicos relacionados ao balanço hídrico e à assimilação de CO_2 sob diferentes condições ambientais.

4.2 PARÊNQUIMA PALIÇÁDICO

Os resultados da análise de variância para os parâmetros anatômicos do parênquima paliçádico encontram-se apresentados na Tabela 3.

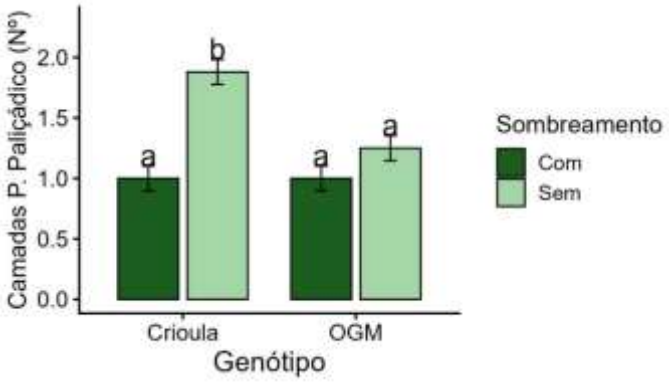
Tabela 3 - Quadrados médios da análise de variância (ANOVA) para número de células do parênquima paliçádico, área do parênquima paliçádico (PP_Area), tamanho das células do parênquima paliçádico (PP_Tam), número de camadas do parênquima paliçádico (PP_Cam), número de células do parênquima esponjoso (PE_Qcel) e área do parênquima esponjoso (PE_Area).

Fonte de variação	**GL**	**Quadrados Médios**					
		Quantidade	**PP_Area**	**PP_Tam**	**PP_Cam**	**PE_Qcel**	**PE_Area**
Blocos	3	0,6146^{ns}	21.354^{ns}	48,75^{ns}	0,1979^{ns}	0,4844^{ns}	1.822^{ns}
Déficit hídrico (D)	1	7,0312*	331.705**	840,50**	0,0313^{ns}	5,6953*	23.113*
Genótipo (G)	1	3,7812^{ns}	90.738^{ns}	276,13^{ns}	0,7813**	0,5000^{ns}	6.441^{ns}
Sombreamento (S)	1	3,7812^{ns}	9.522^{ns}	2,00^{ns}	2,5313***	8,5078**	50.403**
D × G	1	0,7812^{ns}	3.828^{ns}	36,12^{ns}	0,0313^{ns}	0,9453^{ns}	6.161^{ns}
D × S	1	0,7812^{ns}	43.956^{ns}	144,50^{ns}	0,0313^{ns}	0,1250^{ns}	4.140^{ns}
G × S	1	0,0312^{ns}	25.313^{ns}	78,13^{ns}	0,7813**	0,1953^{ns}	4.560^{ns}
D × G × S	1	0,2812^{ns}	3.741^{ns}	21,13^{ns}	0,0313^{ns}	1,1250^{ns}	3.445^{ns}
Resíduo	21	1,0670	25.776	87,30	0,0789	0,9144	4.174
Média geral		**7,91**	**774,38**	**68,50**	**1,28**	**4,50**	**342,19**
CV (%)		**14,50**	**24,48**	**15,24**	**35,65**	**24,52**	**22,96**

D = déficit hídrico; G = genótipo; S = sombreamento; ns = não significativo; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, pelo teste F; CV = coeficiente de variação. Fonte: Autor (2026).

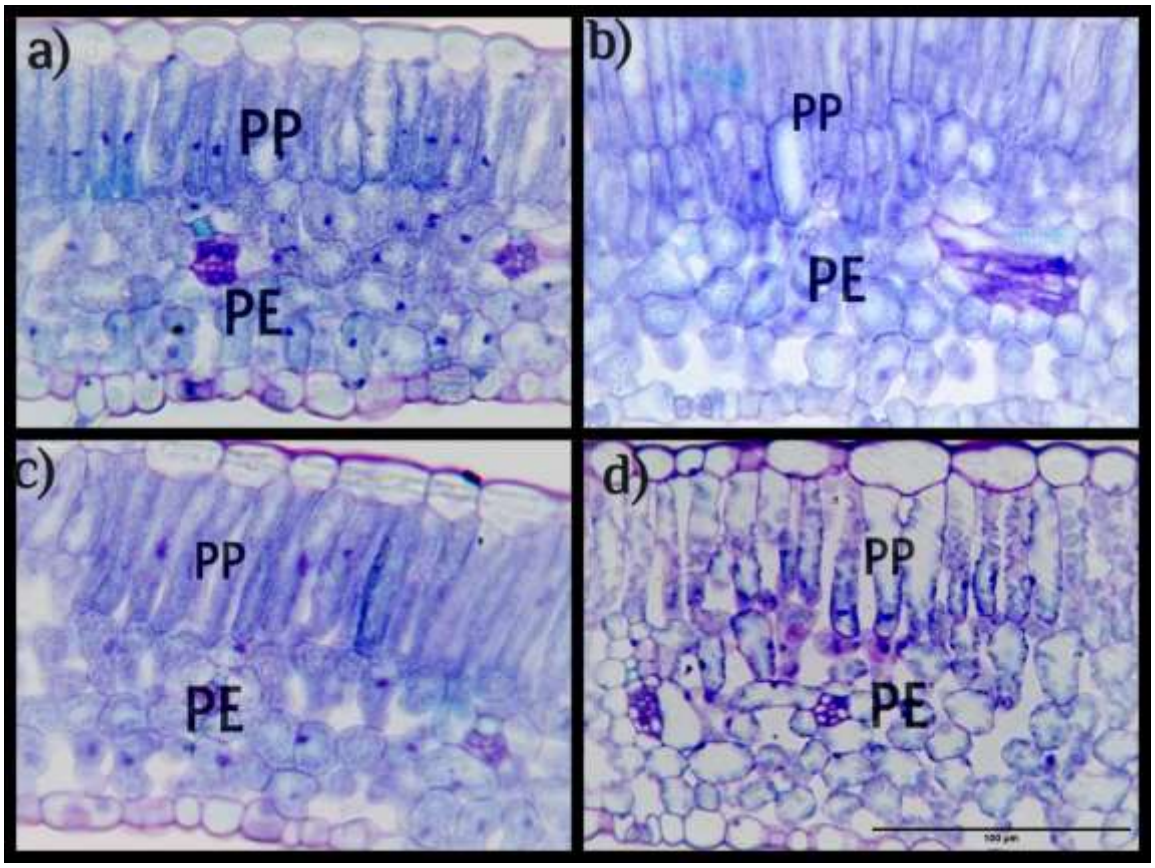
Para o número de camadas do parênquima paliçádico (PP_Cam), foi observada interação significativa entre genótipo e sombreamento ($p < 0,01$), indicando resposta diferenciada dos genótipos em função da disponibilidade luminosa. O genótipo Crioulo apresentou aumento significativo no número de camadas quando cultivado sem sombreamento, alcançando valor aproximadamente 88,0% superior ao observado sob sombreamento. Em contraste, o genótipo OGM não apresentou diferenças significativas entre as condições de irradiância avaliadas. Além disso, na ausência de sombreamento, o genótipo Crioulo apresentou cerca de 50,4% mais camadas de parênquima paliçádico em comparação ao OGM, enquanto sob sombreamento não foram observadas diferenças estatísticas entre os genótipos (Figura 8). Na figura 9, está representada as fotografias da paliçada dos genótipos crioulo e OGM nas duas condições de sombreamento.

Figura 8- Número de camadas do parênquima paliçádico em genótipos de *Phaseolus vulgaris* L. cultivados com e sem sombreamento. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,01$).



Fonte: Autor (2026).

Figura 9 – Anatomia foliar de diferentes genótipos de *Phaseolus vulgaris*, em corte transversal (a) Genótipo crioulo com sombreamento; (b) Genótipo crioulo sem sombreamento; (c) Genótipo OGM com sombreamento; (d) Genótipo OGM sem sombreamento. (PP=Parênquima paliçada; PE=Parênquima Esponjoso).



Fonte: Autor (2026).

Os resultados obtidos corroboram os descritos por Perosini, (2025) e Rodrigues, (2018) que relatam que folhas desenvolvidas sob sombreamento tendem a apresentar menor número de camadas no parênquima paliçádico e células menos alongadas, enquanto condições de maior iluminação favorecem a formação de múltiplas camadas de células paliçádicas, aumentando a capacidade de interceptação da luz. Essa resposta representa uma importante estratégia

adaptativa, uma vez que o parênquima paliçádico concentra grande parte dos cloroplastos da folha e constitui o principal tecido fotossintético. Dessa forma, em ambientes com elevada disponibilidade luminosa, o desenvolvimento de mais camadas de paliçádico aumenta a captura de fótons e potencializa a produção de ATP e NADPH nas reações fotoquímicas da fotossíntese (Terashima *et al*., 2011).

Nesse contexto, o aumento do número de camadas do parênquima paliçádico observado no genótipo Crioulo sob ausência de sombreamento evidenciou maior capacidade de ajuste estrutural às condições ambientais. Em contraste, o genótipo OGM não apresentou alterações significativas nessa característica, sugerindo menor plasticidade anatômica frente às variações de luminosidade. Assim, os resultados indicam que o genótipo Crioulo possui maior plasticidade fenotípica, ajustando de forma mais eficiente a estrutura foliar para otimizar o aproveitamento da energia luminosa disponível em condições ambientais adversas.

4.3 INTERAÇÃO ENTRE OS TECIDOS

A análise conjunta dos resultados evidencia estratégias anatômicas distintas entre os genótipos em resposta à disponibilidade luminosa. Sob sombreamento, o genótipo Crioulo apresentou maior número de camadas do parênquima esponjoso, menor espessura do mesofilo, menor número de camadas do parênquima paliçádico e maior densidade estomática adaxial. Esse conjunto de características sugere a hipótese de uma reorganização estrutural voltada à otimização da captação e utilização do carbono em um ambiente com menor disponibilidade energética (Chauhan *et al*., 2023).

A redução da espessura do mesofilo e do número de camadas paliçádicas representa uma estratégia de economia de recursos, uma vez que a manutenção de tecidos altamente fotossintéticos demanda elevado investimento metabólico (Niinemets, 2009, 2023; Terashima *et al*., 2006). Em contrapartida, o aumento da densidade estomática adaxial pode favorecer a entrada de CO_2, enquanto a maior proporção de parênquima esponjoso pode facilitar sua difusão interna através dos espaços intercelulares. Além disso, a menor espessura do mesofilo reduz a distância entre os estômatos e os cloroplastos presentes no parênquima paliçádico, potencialmente favorecendo a chegada do CO_2 aos sítios de carboxilação, conforme aponta estudos de Perosini (2025).

Em contraste, o genótipo OGM cultivado sob sombreamento apresentou redução da densidade estomática adaxial, porém sem alterações significativas na organização do mesofilo, no número de camadas do parênquima esponjoso ou no número de camadas do parênquima paliçádico. A manutenção dessas características anatômicas mesmo sob redução da irradiância é um indicativo de menor capacidade de ajuste estrutural frente às variações ambientais, evidenciando uma plasticidade fenotípica mais limitada quando comparada ao genótipo Crioulo.

No cultivo sem sombreamento, o genótipo Crioulo apresentou menor número de camadas do parênquima esponjoso, maior espessura do mesofilo, menor densidade estomática adaxial e aumento expressivo do número de camadas do parênquima paliçádico. Esse padrão está de acordo com os resultados descritos por Evans; Poorter (2001), Perosini (2025), Rodrigues (2018) e Terashima *et al*. (2011), que relatam maior desenvolvimento do parênquima paliçádico em condições de elevada irradiância. O aumento das camadas paliçádicas amplia o volume de tecido fotossintético disponível e, consequentemente, a quantidade potencial de cloroplastos capazes de interceptar fótons e sustentar elevadas taxas fotossintéticas. Simultaneamente, o maior desenvolvimento do mesofilo contribui para a distribuição da luz ao longo do tecido foliar e reduz o risco de sobrecarga energética em regiões específicas da folha, evitando fotodanos.

A menor densidade estomática adaxial observada no genótipo Crioulo sob pleno sol, também pode representar uma estratégia adaptativa importante para reduzir perdas de água por transpiração em ambientes de maior demanda evaporativa. Assim, esse genótipo demonstra capacidade de equilibrar o aumento do potencial fotossintético com mecanismos de conservação hídrica. Em conjunto, esses resultados evidenciam elevada plasticidade fenotípica da variedade Crioula, permitindo ajustes coordenados entre a anatomia foliar e as condições ambientais. Esse comportamento está de acordo com observações de Antunes; Bevilaqua; Eicholz, 2020; Bisneto *et al*. (2022), que destacam a ampla variabilidade genética das variedades crioulas e sua maior capacidade de aclimatação a diferentes ambientes de cultivo. Todavia, ao ter uma menor densidade estomática e mais camadas de paliçádica, há uma possibilidade de nessas condições ter menos disponibilidade de CO_2, fator que leva a enzima Rubisco, passar a operar em oxigenasse. Esse processo dá início a fotorrespiração, que tem um gasto elevado de energia. Porém, em futuras pesquisas, torna-se necessário a análise conjunta da condutância estomática bem como da atividade da Ribulose-1,5-bifosfato carboxilase-oxigenase, para conclusões precisas de possíveis processos de *trade-off* fisiológica, nessas

condições ambientais. Levante-se a hipótese de que a variedade crioula pode diminuir a produtividade em condições ambientais adversas, mas ira garantir que sobreviva até o final de seu ciclo para deixar descendentes.

Por sua vez, o genótipo OGM apresentou alterações anatômicas mais discretas em resposta à irradiância, destacando-se principalmente pelo aumento da densidade estomática adaxial e pela manutenção de uma única camada de parênquima paliçádico. Esse comportamento sugere menor plasticidade anatômica em comparação ao genótipo Crioulo. Conforme discutido por Polania *et al*. (2022); Torres; Rodrigues, (1988), a magnitude das respostas de plasticidade fenotípica pode variar substancialmente entre cultivares, refletindo diferenças genéticas na capacidade de ajuste às condições ambientais. Mas esse conservadorismo celular do OGM, torna evidente que a planta está subordinada a manter padrões de produtividade em condições ambientais adversas.

O principal problema é que em condições adversas, como elevada irradiância, o OGM ao ter somente uma camada de paliçádica e ter elevada densidade estomática, sobretudo adaxial, terá eficiência nos sítios de carboxilação pela entrada de CO_2, isso favorece a produção de ATP, logo a produção de fotoassimilados. Mas a hipótese é de ocorrer morte celular por fotoinibição, neste contexto, pelo fato de ter intensa energia luminosa chegando, e poucos centros de reações para recepção e conversão em energia química. A planta entende que desenvolver mais camadas de células paliçádicas é um gasto energético, pois conforme Mizokami *et al*. (2022); Xing *et al*. (2021) desenvolver qualquer estrutura celular envolve gastar ATP. Sendo assim as plantas OGM de feijão mantem um padrão de produtividade, mas que na verdade pelas condições ambientais tendem a senescência, pois evita gastos energéticos na construção de estruturas celulares, para gastar energia na produtividade. Seguindo essa linha, é de estrema importância futuras pesquisas para investigar esse processo de *trade-off* ao submeter esses genótipos a estresses abiótico.

Esse processo de plasticidade fenotípica, observada principalmente no genótipo crioulo, reflete diretamente em processos do manejo dos agroecossistema, pois há uma menor necessidade de intervenção com tecnologias que simplificam os agroecossistemas, e exauri os recursos naturais. Um processo de irrigação talvez não seria necessário para cultivar por exemplo. Pela plasticidade que ela apresentou, técnicas de cobertura de solo, talvez já seria suficiente para manter seu desenvolvimento pleno. Enquanto a cultivar OGM, já seria necessário um maior investimento em técnicas para manter seu metabolismo, em condições

ideais. Com isso, a preservação das sementes crioulas é imprescindível para garantir que em meio à crise climática que está posta, se tenha alimentos com menor investimento de tecnologias que use recursos não renováveis.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa demonstrou que as condições de déficit hídrico e sombreamento influenciaram significativamente a anatomia foliar de *Phaseolus vulgaris* L., evidenciando que o metabolismo vegetal responde continuamente às alterações ambientais por meio da reorganização estrutural dos tecidos. As modificações observadas no mesofilo, na densidade estomática e nos parênquimas indicam mecanismos de aclimatação potencialmente adaptativos relacionados à manutenção das trocas gasosas, da assimilação de carbono bem como de uso eficiente dos recursos.

Os resultados apontaram diferenças nas respostas entre os genótipos avaliados, destacando que o material crioulo apresentou maior plasticidade fenotípica frente às variações de irradiância, desenvolvendo dupla camada de parênquima paliçádico, parênquima esponjoso com mais espaços intercelulares, expressando maior capacidade de ajuste anatômico quando comparado ao material OGM. Embora isso não permita generalizações sobre desempenho agronômico, os dados reforçam a importância de aprofundar os estudos a nível molecular, como teor nutricional, resiliência a pragas e doenças, para conclusões contundentes acerca dos genótipos analisados. Porém, com os resultados obtidos, são reforçadas as análises de pesquisas anteriores sobre as sementes crioula, como de Antunes; Bevilaqua; Eicholz, (2020); Bisneto *et al*. (2022); Santiago; Cargnelutti; Castamam, (2022) sobre a capacidade magnífica das sementes crioulas de se adaptarem a distintos ambientes que são inseridas.

Além disso, as respostas observadas nas plantas não são independentes das condições materiais em que a agricultura é realizada. A intensificação da seca, as alterações na disponibilidade luminosa, entre outros elementos ambientais que incidem sobre o metabolismo vegetal, e que estão em alteração, são inerentes ao processo da simplificação dos agroecossistemas. Graças a simplificação dos sistemas de cultivo, há uma adequação do ambiente que culmina na crise ecológica, logo, torna-se necessário adaptar materiais para sobreviver a nova adequação criada e continuar respondendo as demandas do sistema capitalista, que se baseia em acúmulo de lucro.

Nesse contexto, as sementes crioulas assumem relevância estratégica. Mais do que recursos genéticos, representam patrimônio construído historicamente pelos povos e constituem importante reserva agrobiocultural. Em um cenário de crise climática, sua conservação, estudo e fortalecimento associados aos princípios e bases da agroecologia podem contribuir para ampliar a capacidade adaptativa dos sistemas agrícolas e para garantir a produção de alimentos em bases ecologicamente mais resilientes com alto valor biológico.

REFERÊNCIAS

ALTIERI, Miguel. Agroecologia: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável. 5. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2012.

ALTIERI, Miguel. Agroecologia e os desafios da agricultura contemporânea. **Revista Agroecossistemas**, v. 15, n. 2, 2017.

ALTIERI, Miguel. **Agroecologia**: Princípios e estratégias para a agricultura sustentável. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2004.

ALTIERI, Miguel. ; ROSSET, Peter. Ten reasons why biotechnology will not ensure food security, protect the environment and reduce poverty in the developing world. **AgBioForum**. v. 2, n. 3, p. 155–162, 1999.

ANDRIOLI, Inácio. O uso de transgênicos na agricultura: impactos sobre o meio ambiente, a saúde e a soberania alimentar. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 3, n. 2, 2008.

ANTUNES, Irajá Ferreira; BEVILAQUA, Giberto Antônio P.; EICHOLZ, Eberson Diedrich. Agrobiodiversidade : sementes crioulas e seus guardiões. **EMBRAPA**, p. 24–27, 2020.

APPEZZATO-DA-GLÓRIA, Beatriz; CARMELLO-GUERREIRO, Sandra Maria (ed.). **Anatomia vegetal**. 2. ed. rev. e atual. Viçosa, MG: UFV, 2006. 438 p

ARENAS, Aida Milena García *et al.* Seed keepers, Ecological Knowledge, and Climate Change Adaptation. Risaralda Colombia. **Mundo Agrario**, v. 25, n. 60, p. 1–17, 2024.

AREND, Marcela Corso *et al*. O Sistema CRISPR/Cas9 e a Possibilidade de Edição Genômica para a Cardiologia. **Arq. Bras. Cardiol,** n. 108, jan 2017.

BASSINELLO, Priscila Zaczuk. Qualidade Nutricional, Funcional e Tecnológica do Feijão. ***In***: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H (org.). **Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

BERNY MIER Y TERAN, Jorge C. *et al.* Effect of drought stress on the genetic architecture of photosynthate allocation and remobilization in pods of common bean (Phaseolus vulgaris L.), a key species for food security. **BMC Plant Biology**, v. 19, n. 1, p. 1–15, 2019.

BESPALHOK, J. P. C. *et al*. Potencialidades e riscos do uso de plantas transgênicas: uma análise crítica. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 20, n. 3, 2003.

BISNETO, Ferro *et al.* Characterization and genetic divergence of landraces varieties of bean. **Diversitas Journal**,v. 7, n. 3, p. 1171–1181, 2022.

BOMBARDI, Larissa. Atlas geográfico do uso de agrotóxicos no Brasil e conexões com a União Europeia. São Paulo: FFLCH-USP, 2018.

BOYCE, kevin. How green was Cooksonia? The importance of size in understanding the early evolution of physiology in the vascular plant lineage. **Paleobiology, Cambridge**, v. 34,

n. 2, p. 179–194, 2008.

BRASIL. Lei nº 10.711, de 5 de agosto de 2003. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 ago. 2003.

BRODRIBB, Timothy J. *et al.* Conifer species adapt to low-rainfall climates by following one of two divergent pathways.**PNAS**, v. 111, n. 40, p. 14489–14493, 2014.

CAPORAL, Francisco. **Agroecologia : uma ciência do campo da complexidade**. Brasília: 2009.

CARBONELL, Sérgio Augusto Morais; CHIORATO, Alisson Fernando; BEZERRA, Luiza Maria Capanema. A planta e o grão de feijão e as formas de apresentação aos consumidores. ***In***: FERREIRA, Carlos Magri; BARRIGOSSI, José Alexandre Freitas (org.). **Arroz e feijão:** tradição e segurança alimentar. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. p. 95-117.

CARSON, Rachel. **Primavera Silenciosa**. São Paulo: Melhoramentos, 1969; Gaia, 2010.

CASTILLO, Dennis; JUAN, Figueroa. Are leaf anatomical traits strong predictors of litter decomposability ? Evidence from upper Andean tropical species along a forest successional gradient. **Oecologia**, v. 207, n. 7, p. 1–17, 2025.

CHAUHAN, Jyoti *et al.* Plant Stress Plant photosynthesis under abiotic stresses : Damages , adaptive , and signaling mechanisms. **Plant Stress**, v. 10, n. October, p. 100296, 2023.

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

DOHENY-ADAMS, Timothy *et al.* Genetic manipulation of stomatal density influences stomatal size , plant growth and tolerance to restricted water supply across a growth carbon dioxide gradient. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 367, p. 547–555, 2012.

EVANS, J. R.; POORTER, H. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance : the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, p. 755–767, 2001.

FERREIRA, Carlos Magri. Movimento “Arroz e Feijão: a comida do Brasil” – proposta para valorização da tradicional alimentação. ***In***: FERREIRA, Carlos Magri; BARRIGOSSI, José Alexandre Freitas (org.). **Arroz e feijão:** tradição e segurança alimentar. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021. p. 15-30.

FLEXAS, Jaume *et al*. Variation in Rubisco content and activity under variable climatic factors. **Photosynth Res**, 2013.

FOSTER, John Bellamy. **A ecologia da economia política marxista**. *Lutas Sociais* 28(1): 87–104, 2011.

FREITAS, A. F.; BOMBARDI, L. M. Agrotóxicos e saúde no Brasil: um retrato da exposição e dos impactos. **Estudos Avançados**, v. 32, n. 93, p. 63–84, 2018.

GERRITS, P.O.; SMID, L. A new less toxic polymerization system for the embedding of soft tissues glycol methacrylate and subsequent preparing of serial sections. **American Journal of Microscopy**, v. 132, p. 81-85, 1983.

GLIESSMAN, S. R. Agroecology: the ecology of sustainable food systems. 4. ed. **Boca Raton**: CRC Press, 2020.

GLIESSMAN, S. Agroecologia: Fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2007.

GONÇALVES, João Guilherme Ribeiro *et al.* Drought tolerance evaluated in common bean genotypes. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 43, n. April 2020, 2019.

GONG, Xiangwei *et al.* Mung Bean (*Vigna radiata* L.) Source Leaf Adaptation to Shading Stress Affects Not Only Photosynthetic Physiology Metabolism but Also Control of Key Gene Expression. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. February, p. 1–15, 2022.

HARRISON, Emily L. *et al.* The influence of stomatal morphology and distribution on photosynthetic gas exchange. **The Plant Journal**, p. 768–779, 2020.

HUNGRIA, Mariangela; THOMAS, Richard J.; DÖBEREINER, Johanna. Efeito do sombreamento na fixação biológica do nitrogênio em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 10, p. 1143–1156, 2014.

INTERNATIONAL SERVICE FOR THE ACQUISITION OF AGRI-BIOTECH APPLICATIONS (ISAAA). ***Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops****: 2017*. Ithaca, NY, 2018.

IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. Geneva: IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

JAVORNIK, Tomislav; CAROVI, Klaudija. Phenotyping Common Bean Under Drought Stress : High-Throughput Approaches for Enhanced Drought Tolerance. **Agronomy**, p. 1–35, 2025.

KACHROO, Aardra. Signal regulators of systemic acquired resistance. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. April, p. 1–12, 2015.

KENRICK, P.; CRANE, P. R. The origin and early evolution of plants on land. **Nature, London,** v. 389, p. 33–39, 1997.

KHOURY, Colin K. *et al.* Crop genetic erosion: understanding and responding to loss of crop diversity. **New Phytologist**, v. 233, n. 1, p. 84–118, jan. 2022.

LANNA, A. C.; VIANELLO, R. P.; CARVALHO, M. A. de F. Physiological characterization of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes, water-stress induced with contrasting response towards drought. **Embrapa**, 2016.

LAWSON, Tracy; MATTHEWS, Jack. Guard Cell Metabolism and Stomatal Function. **Annual Review of Plant Biology**, p. 273–302, 2020.

LOZANO-ELENA, Fidel *et al.* Analysis of metabolic dynamics during drought stress in Arabidopsis plants. **Scientific Data**, p. 1–12, 2022.

MANSOOR, Sheikh *et al.* Reactive Oxygen Species in Plants: From Source to Sink. **Antioxidants**, v. 11, n. 2, p. 1–14, 2022.

MARTINEZ, Juan P. Efecto del déficit hídrico en la anatomía foliar de seis cultivares de poroto Phaseolus vulgaris. **Revista Chilena de Historia Natural**, v. 72, p. 219–235, 1999.

MAZOYER, Marcel; ROUDART, Laurence. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. Tradução de Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira. 1. ed. São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural (NEAD), 2010. 568 p. ISBN 978-85-7139-994-5.

MCDOWELL, E. M.; TRUMP, B. R. Histological fixatives for diagnostic light and eléctron microscopy. Archives of Pathology & Laboratory Medicine, v. 100, p. 405-414, 1976.

MEDEIROS, Vera Maria; LOPES, Vanoli José Xavier. Modificações Morfológicas adaptativas nas folhas de feijoeiro comum (Phaseolus vulgaris L.) sob condições de sol e sombra. p. 115–135, 1993.

MÉLO, Anastácia Brandão de *et al*.Sabedoria do viver: práticas tradicionais na adaptação às mudanças do clima. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

MIURA, Kenji *et al.* Regulation of water , salinity , and cold stress responses by salicylic acid. v. 5, n. January, p. 1–12, 2014.

NARDINI, Claiton *et al*. Implications of using shading meshes and plant density on the leaf anatomy of corymbia v. 49, n. 2025, p. 1–13, 2025.

NIINEMETS, Ulo. Role of mesophyll diffusion conductance in constraining potential photosynthetic productivity in the field. v. 60, n. 8, p. 2249–2270, 2009.

NIINEMETS, Ülo. Variation in leaf photosynthetic capacity within plant canopies : optimization , structural , and physiological constraints and inefficiencies. **Photosynthesis Research**, v. 158, n. 2, p. 131–149, 2023.

NOBRE, Carlos. *O aquecimento global acima de 1,5°C é irreversível?* Ecoa/UOL, 06 maio 2025. Disponível em: Ecoa – Carlos Nobre: O aquecimento global acima de 1,5°C é irreversível?.

O'BRIEN, T.O.; MCCULLY, M.E. The study of plant structure: principles and selected methods. Austrália, Thermarcarphi Pty. Ltd. 1981.

OLIVEIRA, Silva *et al.* Effects of microclimatic variation on plant leaf traits at the community level along a tropical forest gradient. **Trees**, v. 37, n. 5, p. 1499–1513, 2023.

PAO, Chia *et al.* ATP compartmentation in plastids and cytosol of Arabidopsis thaliana revealed by fluorescent protein sensing. v. 115, n. 45, 2018.

PANIS, C. *et al.* Agrotóxicos e saúde humana: evidências científicas sobre os impactos do modelo agroquímico. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, n. 3, p. 875–892, 2022.

PEROSINI, Gladison Luciano. Estresse hídrico em phaseolus vulgaris : respostas anatômicas e fisiológicas. p. 1–13, 2025.

PINHO, Alexandra De *et al.* Agrotóxicos e violações nos direitos à saúde e à soberania alimentar em comunidades Guarani Kaiowá de MS, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 29, n. 12, 2024.

POLANIA, Jose A. *et al.* Contrasting Phaseolus Crop Water Use Patterns and Stomatal Dynamics in Response to Terminal Drought. **Frontiers in Plant Science,** v. 13, n. May, 2022.

POORTER, H, ET AL. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. p. 1073–1105, 2019.

PRIMAVESI, Ana. Manejo ecológico do solo: A agricultura sustentável. São Paulo: Editora **Agronômica Ceres**, 2012.

PRODUTIVA, Ncia; CLIM, A. S. CRIOULAS : 2024.

RIBEIRO, Camila *et al.* How Stress Affects Your Budget — Stress Impacts on Starch Metabolism. **Frontiers in Plant Science,** v. 13, n. February, p. 1–9, 2022.

RIBEIRO, Juliana Martins. **Produção e análise de plantas transgênicas**: conceitos e informações básicas. Guaíba: Agrolivros, 2012.

RODRIGUES, Angélica Lino. **Respostas fisiológicas e estruturais em plantas submetidas a estresse hídrico recorrente em diferentes condições de luz**. Botacatu-SP, UNESP, 2018.

SANTIAGO, Gabriela de Melo; CARGNELUTTI, Denise; CASTAMAM, Alfredo. Efficient microorganisms: an alternative tool for drought management in bean plants? **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 17, n. 1, p. 01–09, 2022.

SANTOS, Déborah Y. A. C. dos *et al*. UV-B and Drought Stress Influenced Growth and Cellular Compounds of Two Cultivars of Phaseolus vulgaris L. (*Fabaceae*). **Photochemistry and Photobiology**, v. 97, n. 1, p. 166–179, 2020.

SCHREIBER, Lukas. Transport barriers made of cutin , suberin and associated waxes. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 10, p. 546–553, 2010.

SCOFFONI, Christine; SACK, Lawren. The causes and consequences of leaf hydraulic decline with dehydration. v. 68, n. 16, p. 4479–4496, 2017.

SLAVEYKOVA, Vera I. Navigating Earth ' s biogeochemical dynamics : Integrating elemental cycles , anthropogenic pressures and planetary boundaries. n. June, p. 2023–2026, 2025.

SOLTIS, Douglas. E. *et al*. The origin and diversification of angiosperms. **American Journal of Botany, St. Louis**, v. 95, n. 3, p. 197–199, 2008.

SOUSA, Denis De Pinho; ILKIU-BORGES, Fernanda; SANTANA, Wendell. o 15 Seminário de Iniciação Científica da EMBRAPA 24 e 25 de agosto de 2011 Embrapa Amazônia Oriental, Belém-PA. p. 1–4, 2011.

SOUZA, Thiago Lívio Pessoa Oliveira de *et al.* Circular Técnico EMBRAPA 235. **Comunicado Técnico EMBRAPA**, v. 235, 2016.

STÉDILE, João Pedro (org.). *A questão agrária no Brasil: o debate tradicional – 1500–1960*. São Paulo: Expressão Popular, 2005.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MØLLER, Ian Max; MURPHY, Angus. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 887 p.

TERASHIMA, Ichiro *et al.* Irradiance and phenotype : comparative eco-development of sun and shade leaves in relation to photosynthetic CO 2 diffusion. **Journal of Experimental Botany**.v. 57, n. 2, p. 343–354, 2006.

TERASHIMA, Ichiro *et al.* Leaf Functional Anatomy in Relation to Photosynthesis Leaf Functional Anatomy in Relation to Photosynthesis. **Plant Physiology**. v. 155, p. 108–116, 2011.

TORRES, Heloisa; LVA, Dasi; RODRIGUES, João Domingos. Influéncia do sombreamento causado pelo milho na anatomia da folha de feijoeiro estômatos e tricomas. **EMBRAPA**. v. 23, n. 12, p. 1387–1400, 1988a.

TORRES, Heloisa; LVA, Dasi; RODRIGUES, João Domingos. Influéncia do sombreamento causado pelo milho na anatomia da folha de feijoeiro de diferentes hábitos de crescimento mesofilo. **EMBRAPA**. v. 23,N. 12, p. 1401–1406, 1988b.

TRIPATHY, Baishnab C.; OELMÜLLER, Ralf. Reactive oxygen species generation and signaling in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 7, n. 12, p. 1621-1633, 2012.

VINICIUS, Marcos; LIMA, Francisco José; SCHWARTZ, Eliana. Anatomia foliar de plantas transgênicas e não transgênicas de Glycine max (L .) Merrill (Fabaceae) modified. v. 14, p. 23–31, 2008.

WUYTS, Nathalie *et al.* High-contrast three-dimensional imaging of the Arabidopsis leaf enables the analysis of cell dimensions in the epidermis and mesophyll. **Plant Methods** 6, 17 p. 1–14, 2010.

YANG, Zhirui; LI, Yi. Dissection of RNAi-based antiviral immunity in plants. **Current Opinion in Virology**, v. 32, n. Figure 1, p. 88–99, 2018.

ZOULIAS, Nicholas *et al.* HY5 is not integral to light mediated stomatal development in Arabidopsis. p. 1–13, 2020.