Dinâmicas Sociais Aplicadas:
gestão, direito, comunicação e desenvolvimento contemporâneo



Janailde de Jesus Dutra Pinto
Jersica Tavares Barbosa
Marcones Alves da Silva
Leonardo Faccini Bringer

Conselho Editorial

Everton Henrique Mesquita De Arruda
Andressa Santana Batista
Marcelo Carvalho da Conceição
Patricia da Silva

Avaliadores

Maria Gabrielle Fernandes Vieira de Sousa

Amanda Veríssimo

Publicação: Editora Publique-se
Número do volume: 01
Páginas: 01 à 1000.
Número da edição/revisão: 01
Série: 01.
Cidade: Capão Bonito - SP.

ISBN: 978-65-82888-01-4

DOI: 10.5281/zenodo.20526143

EFEITO DA APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO NA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE SOJA (GLYCINE MAX) CULTIVADAS EM LATOSSOLO VERMELHO.

10.5281/zenodo.20651425

Mayane de Souza Barbosa

Mestre em Produção Vegetal pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Possui especialização em Docência e Gestão do Ensino Superior, Estácio de Sá. Graduação em Agronomia pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia do Pará-Campus Castanhal-PA.

INTRODUÇÃO

A discussão acerca da aplicação foliar de silício na tolerância ao estresse hídrico em plantas de soja cultivadas em Latossolo Vermelho inscreve-se em um campo de análise no qual fisiologia vegetal, ciência do solo e manejo agronômico não podem ser tratados como domínios separados, uma vez que a resposta da cultura emerge da interação entre genótipo, ambiente edáfico, disponibilidade hídrica, condição nutricional e tecnologias aplicadas ao longo do ciclo. A soja, enquanto espécie de elevada expressão nos sistemas produtivos tropicais, apresenta uma dinâmica morfofisiológica marcada pela dependência entre desenvolvimento radicular, expansão foliar, interceptação luminosa, fixação biológica de nitrogênio, formação de vagens e enchimento de grãos, de modo que qualquer perturbação na disponibilidade de água repercute sobre processos que ultrapassam a simples redução do crescimento vegetativo. Souza (2024), ao analisar o desempenho agronômico da soja sob diferentes densidades de semeadura, permite compreender que a cultura responde de maneira sensível ao arranjo espacial e à competição intraespecífica por recursos, enquanto Bicalho (2018) amplia essa leitura ao demonstrar que a época de semeadura reposiciona a planta diante de combinações variáveis de fotoperíodo, temperatura, radiação e precipitação, afetando caracteres agronômicos, adaptabilidade e estabilidade. Essa plasticidade, contudo, não significa neutralidade diante do estresse, pois a soja depende de condições hídricas adequadas em fases fenológicas específicas para manter a atividade fotossintética, a integridade dos tecidos e a translocação de assimilados aos órgãos reprodutivos. Nascimento (2021), ao discutir correlações, divergência genética e seleção de genitores, introduz a dimensão genética desse problema, pois a resposta da soja ao ambiente não se restringe ao manejo aplicado, mas também à capacidade de cada material expressar caracteres associados a vigor, arquitetura, estabilidade e rendimento sob condições contrastantes. Nessa mesma

direção, Gonçalves (2025) contribui ao inserir o uso de bioativos na produção de engalhamento, indicando que intervenções fisiológicas podem alterar a arquitetura da planta e sua ocupação do espaço produtivo, ainda que tais respostas dependam do ambiente em que a cultura se desenvolve. Assim, a soja deve ser compreendida como organismo agronômico cuja produtividade resulta de uma rede de mediações, e não como efeito direto de um único fator de manejo, pois a densidade populacional, a semeadura, a cultivar, a condição fisiológica e a disponibilidade hídrica compõem uma totalidade produtiva na qual a limitação de água pode desorganizar o equilíbrio entre crescimento, metabolismo e reprodução.

A centralidade do Latossolo Vermelho nessa investigação decorre do fato de que o estresse hídrico na soja não se manifesta apenas como ausência climática de precipitação, mas como fenômeno mediado pela estrutura, pela química e pela dinâmica físico-hídrica do solo, sobretudo em ambientes tropicais intensamente manejados. O Latossolo Vermelho, embora apresente profundidade, boa drenagem e ampla ocorrência em áreas agrícolas, carrega limitações relacionadas à baixa fertilidade natural, à acidez, à possível presença de alumínio em subsuperfície, à reduzida disponibilidade de alguns nutrientes e à suscetibilidade à compactação quando submetido a tráfego mecanizado e manejo inadequado da umidade. Oliveira et al. (2004), ao caracterizarem atributos químicos e físico-hídricos de um Latossolo Vermelho após longo período de cultivo, permitem observar que o solo agrícola guarda uma memória das práticas de manejo, de modo que densidade, porosidade, retenção de água e disponibilidade de nutrientes não podem ser lidas como propriedades fixas, mas como resultados históricos da interação entre cultivo, revolvimento, cobertura, adubação e rotação. Essa leitura encontra ressonância em Santos et al. (2012), quando a variabilidade espacial de atributos físicos após cultivo de soja revela que uma mesma área pode conter zonas com diferentes níveis de resistência à penetração, porosidade e umidade, produzindo respostas heterogêneas na lavoura e tornando insuficiente qualquer interpretação homogênea do ambiente edáfico. A compactação, nesse quadro, assume significado fisiológico direto, pois Oliveira et al. (2012) demonstram que níveis distintos de compactação e irrigação alteram a qualidade física do Latossolo Vermelho cultivado com soja, o que indica que a água disponível à planta depende não apenas do volume precipitado ou aplicado, mas também da capacidade do solo de permitir infiltração, armazenamento, aeração e aprofundamento radicular. Girardello et al. (2011), ao avaliar escarificadores e rendimento da soja sob plantio direto, acrescenta que a intervenção mecânica sobre a estrutura pode produzir

efeitos físicos mensuráveis, mas sua duração e sua repercussão produtiva dependem da persistência estrutural do solo e do sistema de manejo subsequente. Pereira e Moraes (2025), ao discutirem a contribuição da braquiária para a fertilidade e o aprofundamento radicular da soja, deslocam a análise para estratégias biológicas de construção do perfil, mostrando que a tolerância hídrica da cultura começa antes da ocorrência da seca, na organização de um ambiente radicular capaz de ampliar o volume explorado. Portanto, ao se investigar soja em Latossolo Vermelho, a restrição hídrica deve ser compreendida como resultado da relação entre clima, perfil edáfico, estrutura porosa, fertilidade, raízes e manejo, e não como evento externo que apenas incide sobre uma planta abstratamente considerada.

A inserção do silício nesse debate exige cuidado conceitual, pois seu uso agronômico tem sido frequentemente apresentado por uma retórica de benefícios amplos, mas a resposta vegetal ao elemento depende da espécie, da fonte, da via de aplicação, da mobilidade interna, da capacidade de acúmulo e do tipo de estresse envolvido. Oliveira (2009), ao investigar feijão e arroz, demonstra que a absorção, o transporte, a redistribuição e a tolerância associada ao silício variam entre culturas, o que impede transferências lineares de resultados obtidos em espécies acumuladoras para culturas que apresentam menor acúmulo, como tende a ocorrer em muitas leguminosas. Martins (2010), ao analisar a cinética de absorção de silício em cultivares de cana-de-açúcar e arroz, reforça que a eficiência fisiológica do elemento depende da capacidade de absorção e da velocidade de incorporação, enquanto Carvalho et al. (2003), ao estudar mudas de eucalipto em Latossolo e Cambissolo, indica que a translocação do silício é também mediada pelas condições do solo, mesmo quando se considera a resposta da planta como unidade analítica. No caso da aplicação foliar, a complexidade se desloca para outra interface, pois a entrada do elemento passa a depender da superfície da folha, da cutícula, da formulação utilizada, da estabilidade da calda, do estádio fenológico e das condições meteorológicas durante a pulverização. Cassel et al. (2021), ao reunir efeitos associados à aplicação de silício, aponta respostas vinculadas à rigidez tecidual, à mitigação de estresses e à proteção fisiológica, mas essa interpretação precisa ser tensionada pela advertência de Santos et al. (2021), para quem o papel do silício nas plantas envolve tanto aspectos estruturais quanto processos metabólicos, o que significa que sua eficácia não pode ser reduzida à simples deposição superficial de compostos silicatados. Neta et al. (2024), ao tratar da dinâmica do silício no sistema solo-planta, permite situar o elemento como parte de uma rede de interações que envolve disponibilidade, absorção, transporte,

nutrição e metabolismo, enquanto Linné et al. (2021) relaciona o silício ao manejo de estresses bióticos e abióticos, sugerindo que sua utilização deve ser interpretada como estratégia condicionada pela natureza da perturbação e pela capacidade responsiva da planta. Desse encadeamento emerge a necessidade de problematizar a aplicação foliar de silício em soja cultivada em Latossolo Vermelho sob déficit hídrico, pois a prática somente adquire sentido científico quando examinada em sua articulação com o solo, a cultura, o estresse e os mecanismos fisiológicos que podem sustentar ou limitar a tolerância vegetal.

Diante dessa articulação entre a sensibilidade fisiológica da soja ao déficit hídrico, a condição físico-química do Latossolo Vermelho como mediadora da disponibilidade de água e a aplicação foliar de silício como possível estratégia de modulação das respostas vegetais ao estresse, torna-se necessário formular a questão que orienta a presente investigação em continuidade direta com o problema teórico delineado: qual é o efeito da aplicação foliar de silício na tolerância ao estresse hídrico em plantas de soja (*Glycine max*) cultivadas em Latossolo Vermelho?

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar o efeito da aplicação foliar de silício na tolerância ao estresse hídrico em plantas de soja (*Glycine max*) cultivadas em Latossolo Vermelho, considerando a interação entre os atributos edáficos do solo, os mecanismos fisiológicos de resposta da cultura ao déficit hídrico e o potencial do silício como elemento associado à mitigação de danos provocados pela limitação de água. Tal objetivo não se limita a verificar a presença ou ausência de resposta agronômica, mas procura compreender em que medida a aplicação foliar pode participar da manutenção de processos fisiológicos relacionados à estabilidade celular, às relações hídricas, às trocas gasosas, à eficiência fotossintética e ao desempenho produtivo da soja, sem desconsiderar que a eficácia dessa intervenção depende do ambiente de cultivo, da condição estrutural do solo, do momento de aplicação, da intensidade do déficit e da capacidade da planta de converter o silício aplicado em resposta funcional. Ao formular esse objetivo, a pesquisa assume que o silício deve ser analisado criticamente, não como insumo dotado de eficácia abstrata, mas como componente de um sistema de manejo cuja pertinência se manifesta apenas quando articulada à fisiologia da cultura e às condições materiais do Latossolo Vermelho.

Os objetivos específicos consistem em caracterizar os aspectos botânicos, fisiológicos e agronômicos da soja associados à sua resposta ao déficit hídrico, examinando como a cultura reorganiza crescimento, metabolismo e reprodução diante da

limitação de água; analisar as propriedades edáficas do Latossolo Vermelho que interferem na disponibilidade hídrica, na exploração radicular e na expressão produtiva da soja, considerando atributos físicos, químicos e físico-hídricos relacionados ao manejo agrícola; discutir os fundamentos da absorção, do transporte e do acúmulo de silício nas plantas cultivadas, com atenção às diferenças entre espécies, vias de aplicação e formas de resposta fisiológica; e interpretar criticamente a aplicação foliar de silício como estratégia de mitigação do estresse hídrico em soja, relacionando seus possíveis efeitos sobre relações hídricas, estabilidade celular, metabolismo antioxidante, fotossíntese, crescimento e produtividade. Esses objetivos específicos estruturam a investigação de modo progressivo, pois partem da cultura e do solo, passam pela fisiologia do silício e alcançam a análise integrada da prática de aplicação foliar em um contexto edafoclimático no qual a tolerância ao estresse hídrico não pode ser dissociada do ambiente radicular nem da capacidade metabólica da planta.

2. A CULTURA DA SOJA E AS IMPLICAÇÕES DO ESTRESSE HÍDRICO NO DESENVOLVIMENTO VEGETAL

2.1 Aspectos botânicos, fisiológicos e agronômicos da soja (*Glycine max*)

A soja, enquanto espécie cultivada de ampla difusão nos sistemas agrícolas tropicais e subtropicais, deve ser compreendida a partir da articulação entre sua constituição botânica, sua plasticidade fisiológica e sua inserção em arranjos produtivos marcados por elevada dependência das condições edafoclimáticas, uma vez que *Glycine max* não se reduz a uma planta oleaginosa de interesse econômico, mas constitui um organismo cuja expressão fenotípica resulta da interação entre genótipo, ambiente e manejo. Do ponto de vista botânico, a soja pertence à família Fabaceae, apresenta hábito herbáceo, ciclo anual, sistema radicular pivotante com ramificações laterais, folhas trifolioladas, flores papilionáceas e frutos em forma de vagens, características que organizam sua morfologia funcional e permitem compreender sua capacidade de exploração do solo, sua arquitetura aérea e sua resposta às variações de densidade populacional, disponibilidade hídrica, luminosidade e fertilidade. Essa arquitetura vegetal, entretanto, não pode ser analisada de maneira estática, pois a conformação do caule, o número de nós, o engalhamento, a área foliar, a altura de inserção das primeiras vagens e a distribuição de estruturas reprodutivas variam conforme a cultivar, o ambiente e o arranjo espacial adotado, razão pela qual Souza (2024) examina o desempenho

agronômico da cultivar UFV1 sob diferentes densidades de semeadura, demonstrando que a população de plantas atua como variável de manejo capaz de modificar a competição intraespecífica por radiação, água e nutrientes, repercutindo na expressão de caracteres produtivos e no equilíbrio entre crescimento vegetativo e formação de componentes de rendimento. A compreensão botânica da soja, nesse sentido, exige ultrapassar a descrição morfológica isolada e situar cada estrutura vegetal em sua função ecológica e produtiva, pois o sistema radicular, além de sustentar a planta e absorver água e nutrientes, participa de interações rizosféricas que interferem no metabolismo nitrogenado, enquanto a parte aérea organiza a interceptação luminosa e condiciona a eficiência fotossintética, especialmente em cultivos submetidos a ajustes de espaçamento, época de semeadura e densidade. A análise de Rocha (2017), ao tratar da identificação de ambiente propício à hibridação da soja no Ceará, contribui para essa discussão ao deslocar o olhar para as exigências reprodutivas da espécie, já que a hibridação demanda condições ambientais e fenológicas compatíveis com florescimento, viabilidade floral, sincronização entre genitores e manejo técnico das estruturas reprodutivas, aspectos que permitem perceber a soja como uma cultura de reprodução predominantemente autógama, mas passível de manipulação genética em programas de melhoramento. Essa condição tem implicações agronômicas diretas, pois a seleção de cultivares não depende apenas de produtividade média, mas da estabilidade de caracteres morfofisiológicos em ambientes contrastantes, questão desenvolvida por Nascimento (2021) ao abordar análise dialélica, correlações e divergência genética em soja para seleção de genitores, situando a variabilidade genética como eixo de construção de cultivares com maior adequação a condições específicas de cultivo. Assim, a botânica da soja não se limita ao reconhecimento taxonômico da espécie, mas se desdobra em uma leitura funcional de sua organização vegetativa e reprodutiva, na qual os caracteres morfológicos se tornam indicadores de adaptação, competição, reprodução, produtividade e resposta ao manejo agrícola.

A fisiologia da soja estrutura-se em torno de processos metabólicos que articulam crescimento, assimilação de carbono, absorção de nutrientes, regulação hídrica, florescimento, enchimento de grãos e senescência, constituindo uma dinâmica em que as fases fenológicas não se sucedem como simples etapas cronológicas, mas como momentos de reorganização interna do metabolismo vegetal diante das condições ambientais. Em cultivos comerciais, o desempenho fisiológico da soja depende da capacidade de manter adequada interceptação de radiação, eficiência fotossintética,

condutância estomática, transporte de fotoassimilados e balanço entre crescimento vegetativo e reprodutivo, sendo que alterações na época de semeadura podem deslocar a planta para combinações distintas de fotoperíodo, temperatura, precipitação e radiação, afetando o ciclo, a altura de plantas, o número de vagens, a massa de grãos e a estabilidade produtiva. Bicalho (2018), ao investigar a influência da época de semeadura em caracteres agronômicos, adaptabilidade e estabilidade de cultivares de soja, permite compreender que a fisiologia da cultura responde de modo integrado ao calendário agrícola, pois a semeadura não apenas define o início do ciclo, mas reposiciona todo o desenvolvimento da planta em relação aos regimes ambientais disponíveis, produzindo efeitos sobre duração das fases vegetativa e reprodutiva, acúmulo de biomassa e formação do rendimento. Essa leitura ganha densidade quando confrontada com estudos voltados ao uso de substâncias ou organismos capazes de alterar respostas fisiológicas, como ocorre em Gonçalves (2025), que analisa o uso de *Bacillus velezensis* na produção de bioativos para o engalhamento da soja, inserindo a discussão sobre microrganismos benéficos no campo da fisiologia aplicada, uma vez que bioativos microbianos podem interferir na emissão de ramos, no vigor vegetativo, na exploração radicular e na alocação de recursos, ainda que seus efeitos devam ser interpretados conforme ambiente, cultivar e manejo. De modo análogo, Lara Ledesma (2009), ao avaliar bioestimulantes foliares na produção da soja em Babahoyo, contribui para a compreensão de que a fisiologia foliar constitui uma via de intervenção agronômica sobre o metabolismo da planta, pois aplicações foliares podem afetar nutrição, metabolismo secundário, tolerância a condições adversas e formação de componentes produtivos, embora a eficácia dessas práticas dependa da composição do produto, do estádio fenológico, das condições climáticas no momento da aplicação e da capacidade da planta de incorporar ou responder aos estímulos recebidos. Ao mesmo tempo, a fisiologia da soja não deve ser tratada apenas sob a lógica da maximização produtiva, já que sua composição bioquímica, especialmente a presença de proteínas, lipídios e compostos bioativos, também integra sua singularidade como espécie de uso alimentar, industrial e farmacológico, aspecto que aparece em Hollenbach (2008) ao investigar formulações fitoterápicas comerciais contendo soja em estudo de toxicidade reprodutiva, indicando que os constituintes da planta extrapolam o campo agronômico e alcançam dimensões biológicas relacionadas ao consumo humano e à segurança de produtos derivados. Essa ampliação do debate impede uma visão estreita da fisiologia vegetal, pois a soja reúne processos primários de crescimento e reprodução, mecanismos de adaptação ao ambiente e atributos bioquímicos que condicionam seus usos sociais,

produtivos e tecnológicos. Ainda que Silva (2022) tenha desenvolvido sua investigação com cultivares de amendoim em condições semiáridas, sua abordagem sobre descritores fisiológicos e agronômicos oferece uma chave comparativa útil para pensar leguminosas sob restrições ambientais, pois caracteres como área foliar, eficiência no uso da água, produção de biomassa e componentes de rendimento adquirem valor analítico quando interpretados como mediadores entre condição ambiental e resposta produtiva, o que permite relacionar a soja a um conjunto mais amplo de culturas cuja performance depende da coordenação entre metabolismo, arquitetura vegetal e manejo.

Sob a perspectiva agronômica, a soja configura-se como cultura cuja produtividade decorre de um sistema de decisões interdependentes, envolvendo escolha de cultivar, qualidade fisiológica das sementes, época de semeadura, densidade populacional, fertilidade do solo, manejo hídrico, controle fitossanitário, inoculação, bioestimulação, arquitetura da lavoura e adequação regional, de modo que nenhum componente isolado explica satisfatoriamente o rendimento final. A densidade de semeadura, examinada por Souza (2024), interfere na distribuição espacial das plantas e altera a intensidade da competição por recursos, podendo modificar altura, ramificação, fechamento do dossel, interceptação luminosa e número de estruturas reprodutivas por planta, o que torna o arranjo populacional uma variável agronômica vinculada tanto à morfologia quanto à fisiologia da cultura. A época de semeadura, por sua vez, discutida por Bicalho (2018), não representa apenas uma escolha operacional, mas um dispositivo de sincronização entre ciclo da cultivar e ambiente, pois deslocamentos temporais podem expor a soja a déficits hídricos, temperaturas inadequadas ou fotoperíodos menos favoráveis em fases de florescimento e enchimento de grãos, afetando a estabilidade e a adaptabilidade das cultivares. A seleção genética, abordada por Nascimento (2021), insere-se nesse mesmo campo de decisões, uma vez que a divergência genética, as correlações entre caracteres e a escolha de genitores orientam a constituição de materiais mais ajustados a objetivos agronômicos específicos, incluindo produtividade, estabilidade, arquitetura, precocidade e tolerância a condições adversas. Ao investigar ambientes de hibridação no Ceará, Rocha (2017) também reforça que o melhoramento da soja depende de condições técnicas e ambientais que permitam manipular a reprodução da espécie, o que aproxima o campo botânico do campo agronômico e demonstra que a geração de variabilidade não se realiza à margem das características climáticas regionais. Em outra direção, Gonçalves (2025) amplia a análise do manejo ao incorporar *Bacillus velezensis* como agente associado à produção de bioativos para engalhamento, trazendo

para a agronomia da soja a discussão sobre tecnologias biológicas capazes de modular respostas vegetativas e possivelmente contribuir para maior ocupação do espaço produtivo, embora essa abordagem exija avaliação criteriosa dos efeitos sobre rendimento, equilíbrio vegetativo e reprodutivo, custo de aplicação e compatibilidade com o sistema de produção. Lara Ledesma (2009), ao trabalhar com bioestimulantes foliares, aproxima-se dessa problemática ao tratar a superfície foliar como via de manejo e intervenção sobre o desempenho da cultura, o que dialoga diretamente com estratégias contemporâneas de aplicação de nutrientes, indutores fisiológicos e compostos mitigadores de estresse. Nessa engrenagem produtiva, o solo aparece como matriz material de sustentação do cultivo, pois a soja depende da disponibilidade de água, aeração, estrutura física, fertilidade química e atividade biológica para expressar seu potencial, sendo que em ambientes tropicais o manejo de solos altamente intemperizados, como os Latossolos, exige correção da acidez, suprimento de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e micronutrientes, além de práticas capazes de preservar agregação, infiltração e retenção hídrica. A análise agronômica da soja, portanto, não pode ser reduzida à mensuração de produtividade em sacas por hectare, pois cada resultado produtivo condensa relações entre genética, fisiologia, botânica, solo, clima e manejo; por isso, quando a cultura é pensada em cenários de restrição hídrica ou em estudos sobre aplicação foliar de elementos benéficos, como o silício, torna-se indispensável compreender previamente que sua resposta não deriva de um único fator, mas de uma rede de mediações em que a planta ajusta arquitetura, metabolismo, reprodução e alocação de fotoassimilados às condições concretas de cultivo, convertendo o desempenho agronômico em expressão sintética de processos biológicos e decisões técnicas historicamente construídas no interior dos sistemas agrícolas.

2.2 Latossolo Vermelho: características edáficas e sua relação com o cultivo da soja

O Latossolo Vermelho, enquanto classe pedológica amplamente distribuída em áreas agrícolas brasileiras e fortemente associada à expansão da sojicultura em ambientes tropicais, deve ser compreendido como corpo natural profundamente intemperizado, marcado por elevada evolução pedogenética, predomínio de minerais de baixa atividade, presença expressiva de óxidos de ferro responsáveis pela coloração avermelhada, estrutura granular em condições preservadas, alta profundidade efetiva e, simultaneamente, limitações químicas e físico-hídricas que condicionam a expressão produtiva da soja. Essa aparente ambivalência entre profundidade, drenagem e boa

trabalhabilidade, de um lado, e baixa fertilidade natural, acidez, saturação por alumínio e susceptibilidade à compactação superficial e subsuperficial, de outro, impede que o Latossolo Vermelho seja interpretado como simples suporte inerte da lavoura, pois sua participação no sistema produtivo se dá por meio de propriedades que regulam enraizamento, retenção de água, difusão de oxigênio, disponibilidade de nutrientes e resistência mecânica à penetração. A caracterização química e físico-hídrica realizada por Oliveira et al. (2004), após vinte anos de manejo e cultivo, permite reconhecer que o uso agrícola prolongado altera atributos como densidade, porosidade, estabilidade estrutural, capacidade de retenção de água e distribuição de nutrientes no perfil, demonstrando que o solo cultivado acumula marcas históricas das práticas de manejo, das rotações adotadas, da intensidade de tráfego de máquinas e das estratégias de correção e adubação. No caso da soja, essa historicidade edáfica assume expressão ainda mais nítida, porque a cultura apresenta sistema radicular capaz de explorar camadas profundas quando não encontra impedimentos físicos ou químicos, mas tem seu desempenho limitado quando camadas compactadas, baixa macroporosidade, acidez subsuperficial ou deficiência nutricional restringem a expansão das raízes e reduzem o volume de solo efetivamente explorado. A discussão desenvolvida por Spera et al. (2011), ao analisar atributos químicos restritivos de Latossolo Vermelho distrófico sob tipos de manejo e rotação de culturas, reforça que a fertilidade não pode ser reduzida à aplicação pontual de corretivos e fertilizantes, uma vez que a disponibilidade de bases, fósforo, matéria orgânica e a redução de alumínio tóxico dependem de processos acumulativos e espacialmente heterogêneos, atravessados pela dinâmica de resíduos culturais e pela intensidade de mobilização do solo. Quando se articula essa leitura com os dados de Santos et al. (2012) sobre variabilidade espacial de atributos físicos após cultivo de soja, torna-se possível perceber que a lavoura não se desenvolve sobre uma superfície homogênea, mas sobre um mosaico de microambientes edáficos em que densidade, porosidade, resistência à penetração e umidade podem variar dentro da mesma área, produzindo respostas diferenciadas no crescimento vegetativo, na nodulação, no fechamento do dossel e na formação de componentes de rendimento. Assim, a relação entre Latossolo Vermelho e soja não se estabelece apenas pela aptidão geral do solo à mecanização ou pela possibilidade de correção química, mas pela forma como atributos físicos, químicos e hídricos se combinam em escalas horizontais e verticais, exigindo que a análise agronômica considere tanto a fertilidade construída quanto a arquitetura estrutural do perfil, pois a soja responde não apenas ao teor de

nutrientes disponível, mas também à possibilidade concreta de interceptar esses recursos por meio de raízes funcionais em um ambiente poroso, aerado e hidricamente acessível.

A qualidade física do Latossolo Vermelho adquire centralidade analítica quando o cultivo da soja se realiza sob plantio direto, tráfego mecanizado e sucessão intensiva de culturas, pois a manutenção da cobertura superficial e a redução do revolvimento não eliminam, por si mesmas, a formação de camadas compactadas, especialmente em áreas submetidas a máquinas pesadas, operações em umidade inadequada e ausência de rotações com espécies de maior capacidade de descompactação biológica. A compactação modifica a organização dos poros, eleva a densidade aparente, reduz a macroporosidade, limita a infiltração e a redistribuição da água, compromete a difusão gasosa e impõe maior resistência mecânica ao crescimento radicular, produzindo um encadeamento de efeitos que ultrapassa a dimensão física e alcança a fisiologia da soja, pois raízes confinadas exploram menor volume de solo, absorvem menos água em períodos secos, apresentam menor acesso a nutrientes pouco móveis e podem comprometer o equilíbrio entre área foliar e suprimento hídrico. Oliveira et al. (2012), ao examinarem a qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e irrigação, permitem compreender que o efeito da compactação não se manifesta de forma isolada, já que sua intensidade agronômica depende da condição hídrica: sob maior disponibilidade de água, determinados danos podem ser parcialmente amortecidos, enquanto sob déficit hídrico a restrição física tende a ampliar a limitação ao crescimento radicular e à manutenção do fluxo transpiratório. Essa relação entre estrutura e água tensiona interpretações simplificadas que atribuem a queda de produtividade exclusivamente à estiagem ou exclusivamente ao manejo físico, pois em solos compactados a água pode estar presente, mas menos acessível, mal distribuída no perfil ou associada a um ambiente de baixa aeração, de modo que a cultura experimenta simultaneamente restrição mecânica, desequilíbrio hídrico e limitação metabólica. Giarola et al. (2009), ao estudarem cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado, acrescentam a essa discussão o componente genotípico, pois cultivares podem diferir na capacidade de tolerar ambientes fisicamente restritivos, seja por variações na arquitetura radicular, seja por diferenças no vigor vegetativo, no ciclo ou na plasticidade diante da limitação edáfica. O manejo mecânico da compactação, por sua vez, deve ser analisado sem pressupor efeito linear e permanente, como se a simples mobilização profunda restaurasse integralmente a funcionalidade do solo; Girardello et al. (2011), ao avaliarem alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob

plantio direto induzidas por diferentes escarificadores e sua relação com o rendimento da soja, indicam que a escarificação pode reduzir temporariamente a resistência à penetração e alterar a porosidade, mas seus efeitos dependem do equipamento, da profundidade atingida, da umidade no momento da operação, da persistência estrutural e da recomposição promovida pelo sistema de culturas. Nesse ponto, a análise de Montanari, Mário e Queiroz (2024) sobre variabilidade espacial de atributos físicos em Latossolo Vermelho sob plantio direto com rotação de culturas amplia a compreensão da heterogeneidade física, pois mesmo sistemas com cobertura e rotação podem apresentar padrões espaciais diferenciados de compactação, o que desloca o manejo da lógica uniforme para uma leitura territorializada da lavoura. A soja, nessa trama, não apenas sofre os efeitos da estrutura do solo, mas também participa de sua transformação por meio da distribuição radicular, da deposição de resíduos, da demanda por operações agrícolas e da sucessão com outras espécies, razão pela qual a qualidade física do Latossolo Vermelho deve ser pensada como construção dinâmica, na qual decisões de tráfego, rotação, escarificação, cobertura, irrigação e escolha de cultivares reorganizam continuamente as condições de emergência, crescimento, nutrição e reprodução da cultura.

A relação entre Latossolo Vermelho e soja torna-se ainda mais complexa quando se incorporam práticas de rotação de culturas, uso de gramíneas, manejo da fertilidade e aprofundamento radicular como estratégias integradas de construção do perfil produtivo, pois a produtividade da soja em solos tropicais não depende somente da camada superficial corrigida, mas da continuidade física, química e biológica que permite à planta atravessar horizontes compactados, explorar reservas hídricas em profundidade e sustentar o enchimento de grãos durante oscilações climáticas. A contribuição do uso de braquiária para a fertilidade de um Latossolo Vermelho e para o aprofundamento radicular da soja, investigada por Pereira e Moraes (2025), insere-se precisamente nessa problemática, pois gramíneas de sistema radicular agressivo podem atuar na formação de bioporos, na ciclagem de nutrientes, no incremento de carbono orgânico e na melhoria da agregação, criando condições para que raízes de soja ocupem camadas mais profundas e encontrem menor resistência à penetração. Essa perspectiva dialoga com Spera et al. (2011), uma vez que a rotação de culturas não se limita à alternância formal de espécies, mas interfere na redistribuição de nutrientes, na decomposição de resíduos, na atividade microbiana e na mitigação de atributos químicos restritivos, especialmente em Latossolos distróficos, nos quais a fertilidade natural baixa impõe dependência de manejo

continuado. A integração entre propriedades físicas e químicas também se aproxima da leitura de Oliveira et al. (2004), pois a trajetória de manejo por longo período redefine simultaneamente a estrutura e a fertilidade, fazendo com que a resposta da soja seja produto de uma memória edáfica acumulada e não apenas da adubação aplicada em uma safra específica. Em áreas onde a variabilidade espacial descrita por Santos et al. (2012) se expressa de modo acentuado, o aprofundamento radicular pode ser desigual, gerando zonas de maior ou menor exploração hídrica dentro do talhão; por isso, a interpretação dos resultados de produtividade deve considerar que a planta integra, em seu crescimento, microdiferenças de densidade, porosidade, umidade e disponibilidade nutricional. A análise de Montanari, Mário e Queiroz (2024) reforça essa exigência ao tratar a variabilidade física sob plantio direto e rotação de culturas, pois o manejo conservacionista não produz automaticamente uniformidade estrutural, mas pode reduzir ou redistribuir limitações conforme a composição da rotação, a intensidade do tráfego e a permanência de raízes no perfil. Em sistemas nos quais a compactação persiste, a escarificação analisada por Girardello et al. (2011) pode ser compreendida como intervenção corretiva localizada no tempo, enquanto o uso de braquiária e rotações diversificadas opera como estratégia de reconstrução gradual da funcionalidade edáfica, ainda que ambas as práticas devam ser avaliadas em sua interação com chuva, textura, teor de matéria orgânica, equipamentos agrícolas e resposta das cultivares. A irrigação, discutida por Oliveira et al. (2012) em associação com compactação, não substitui a qualidade estrutural, pois o fornecimento de água em solo fisicamente limitado pode não restabelecer plenamente o crescimento radicular nem a difusão de oxigênio, o que torna a disponibilidade hídrica um fenômeno dependente da arquitetura porosa e não apenas do volume aplicado ou precipitado. Nesse sentido, cultivar soja em Latossolo Vermelho implica gerir um sistema no qual a planta responde à fertilidade corrigida, à resistência mecânica, à continuidade dos poros, à profundidade explorável, à atividade biológica e à distribuição espacial dos atributos, de modo que a lavoura bem-sucedida não resulta da adaptação abstrata da cultura ao solo, mas da construção técnica de um ambiente radicular capaz de sustentar absorção de água e nutrientes ao longo do ciclo; quando esse ambiente é interrompido por compactação, acidez subsuperficial ou baixa estabilidade estrutural, a soja passa a expressar na parte aérea as limitações invisíveis do perfil, convertendo menor crescimento, menor eficiência fisiológica e menor rendimento em sinais agronômicos de uma condição edáfica cuja leitura exige integrar ciência do solo, fisiologia vegetal e manejo agrícola em uma mesma matriz interpretativa.

3. O SILÍCIO COMO ELEMENTO BENÉFICO NA FISIOLOGIA E NA PROTEÇÃO DAS PLANTAS

3.1 Absorção, transporte e acúmulo de silício nas plantas cultivadas

A absorção de silício pelas plantas cultivadas constitui um processo fisiológico cuja compreensão exige articular a disponibilidade do elemento no solo, sua forma química predominante na solução, a atividade dos sistemas radiculares, a especificidade genética das espécies e a dinâmica de transporte que conecta a rizosfera aos tecidos aéreos. Embora o silício não seja classificado tradicionalmente como elemento essencial para todas as plantas superiores, sua presença em sistemas agrícolas tem sido associada à modulação de processos fisiológicos, nutricionais e estruturais, sobretudo em espécies acumuladoras, como arroz e cana-de-açúcar, nas quais a absorção pode atingir níveis expressivos e interferir no comportamento da planta diante de estresses ambientais. Na solução do solo, o silício é absorvido predominantemente na forma de ácido monossilícico, cuja concentração depende da mineralogia, do pH, da matéria orgânica, da umidade, da textura, do grau de intemperismo e das práticas de manejo, de modo que solos tropicais altamente intemperizados, frequentemente pobres em silício prontamente disponível, podem limitar a incorporação do elemento mesmo quando a planta apresenta capacidade fisiológica para absorvê-lo. A discussão conduzida por Oliveira (2009), ao investigar feijão e arroz quanto à absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio, permite observar que a absorção de silício não obedece a um padrão uniforme entre culturas, pois o arroz se comporta como espécie de elevada acumulação, enquanto o feijão apresenta dinâmica mais restrita, indicando que a capacidade de internalização do elemento depende de mecanismos radiculares e de características anatômicas que variam entre grupos botânicos. Essa heterogeneidade também aparece em Martins (2010), quando a cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz é analisada sob a perspectiva da taxa de influxo, da afinidade pelos transportadores e da concentração externa do elemento, permitindo compreender que não basta conhecer a presença de silício no ambiente edáfico, pois a resposta vegetal depende da interação entre disponibilidade externa e competência fisiológica de absorção. A abordagem de Carvalho et al. (2003), ao estudar mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo, acrescenta outro plano de complexidade, uma vez que a absorção e a translocação de silício se alteram conforme o tipo de solo, revelando que a dinâmica solo-planta não pode ser dissociada das propriedades químicas e físicas do meio de cultivo. Nesse sentido, Neta et al. (2024) discutem a dinâmica do silício no sistema solo-planta como um fluxo

condicionado por processos de solubilização, adsorção, precipitação, absorção radicular e redistribuição interna, o que desloca o tema para além da fertilização silicatada em sentido estrito e o insere em uma ecologia nutricional mais ampla, na qual o elemento circula entre matriz mineral, solução do solo, superfície radicular e compartimentos celulares. A absorção, portanto, não deve ser tratada como entrada passiva de um nutriente suplementar, pois envolve gradientes de concentração, transportadores específicos em determinadas espécies, fluxo transpiratório, crescimento radicular, estado hídrico e demanda metabólica, compondo uma rede de mediações que define se o silício permanecerá em baixa concentração tecidual ou se será incorporado em quantidades suficientes para produzir alterações anatômicas e fisiológicas mensuráveis.

O transporte de silício no interior da planta decorre da passagem do ácido monossilícico das raízes para o xilema e, posteriormente, de sua distribuição aos tecidos aéreos, em um movimento fortemente associado ao fluxo transpiratório, embora em espécies acumuladoras essa trajetória também dependa de transportadores de influxo e efluxo localizados em células radiculares, capazes de regular a entrada e a carga xilemática do elemento. Essa dimensão torna-se analiticamente fecunda porque impede reduzir a translocação de silício à simples ascensão da seiva bruta, já que diferentes espécies apresentam padrões contrastantes de absorção ativa, transporte facilitado ou baixa mobilização, o que explica por que plantas cultivadas no mesmo solo podem acumular teores muito distintos do elemento. Oliveira e Abreu Junior (2009), ao abordarem o silício em plantas de feijão e arroz, reforçam essa diferenciação ao compararem culturas com comportamentos fisiológicos divergentes, sugerindo que o acúmulo nos tecidos aéreos resulta de uma sequência coordenada de absorção radicular, transferência ao xilema e deposição em órgãos com maior transpiração. Em plantas como arroz, nas quais a acumulação é elevada, o transporte tende a culminar em deposição expressiva nas folhas, bainhas e estruturas epidérmicas, enquanto em culturas menos acumuladoras o silício pode permanecer em concentrações reduzidas, com menor repercussão anatômica. Carvalho et al. (2003), ao examinarem a absorção e a translocação em eucalipto, mostram que a espécie, o solo e a disponibilidade do elemento modulam a quantidade deslocada para a parte aérea, permitindo compreender que o transporte interno não é uma propriedade abstrata da planta, mas uma expressão fisiológica condicionada pela interface entre genótipo e ambiente. A cinética descrita por Martins (2010) amplia essa interpretação ao indicar que cultivares de cana-de-açúcar e arroz podem apresentar diferenças na velocidade e na eficiência de absorção, o que repercute diretamente na

quantidade transportada e acumulada, especialmente quando a disponibilidade externa varia. Essa leitura dialoga com Cassel et al. (2021), que discutem os benefícios da aplicação de silício em plantas a partir da relação entre incorporação tecidual e respostas como maior rigidez estrutural, redução de transpiração excessiva, proteção contra estresses e alteração de processos fisiológicos, mas tais benefícios dependem de que o elemento seja efetivamente absorvido e conduzido aos locais de deposição. A discussão de Santos et al. (2021) sobre o papel do silício nas plantas também se insere nesse ponto, pois a atuação do elemento se relaciona tanto à sua presença física em tecidos epidérmicos quanto à indução de respostas metabólicas, o que significa que o transporte não apenas desloca uma molécula no interior do vegetal, mas viabiliza sua participação em processos estruturais e bioquímicos. Em culturas submetidas a limitações nutricionais, como no estudo de Princi (2022) sobre o uso do silício na atenuação dos danos causados pela deficiência moderada de ferro em cana-energia, a movimentação interna do elemento passa a ser interpretada em associação com o metabolismo mineral e com ajustes fisiológicos capazes de alterar o equilíbrio entre nutrição, crescimento e tolerância. Dessa forma, o transporte de silício nas plantas cultivadas expressa uma fisiologia da circulação que vincula raiz, xilema, transpiração, tecidos epidérmicos e metabolismo, recusando explicações lineares e exigindo que cada cultura seja avaliada segundo sua capacidade própria de absorver, translocar e converter o elemento em efeitos morfofisiológicos.

O acúmulo de silício nos tecidos vegetais ocorre, em grande medida, pela polimerização do ácido monossilícico e formação de sílica amorfa, frequentemente depositada em paredes celulares, espaços intercelulares, células epidérmicas, tricomas e estruturas associadas à superfície foliar, produzindo uma espécie de reorganização físico-química da planta que pode alterar resistência mecânica, perda de água, interceptação de radiação, ataque de patógenos, herbivoria e resposta a toxidez ou deficiência mineral. Essa deposição, contudo, não deve ser interpretada apenas como formação de uma barreira inerte, pois a literatura recente tem deslocado o silício para uma posição mais complexa, na qual sua presença nos tecidos se articula à modulação de enzimas antioxidantes, à expressão de respostas de defesa, à homeostase iônica, ao metabolismo de compostos fenólicos e à regulação indireta de danos oxidativos. Cassel et al. (2021) tratam os benefícios da aplicação de silício considerando tanto efeitos físicos quanto fisiológicos, enquanto Santos et al. (2021) discutem sua atuação em diferentes processos vegetais, compondo uma leitura em que o acúmulo se converte em condição material para respostas de tolerância, mas não se confunde integralmente com elas. No trabalho de

Oliveira (2009), a relação entre silício, feijão, arroz e tolerância ao cádmio permite compreender que o acúmulo do elemento pode interferir na dinâmica de metais potencialmente tóxicos, seja pela redução da absorção, pela compartimentalização, pela atenuação do estresse oxidativo ou pela alteração de barreiras anatômicas, ainda que tais mecanismos variem conforme a espécie e o nível de acumulação. Essa dimensão se aproxima da análise de Neta et al. (2024), para quem a participação do silício no metabolismo e na nutrição das plantas deve ser compreendida em interação com o sistema solo-planta, pois a deposição tecidual resulta de processos anteriores de disponibilidade, absorção e transporte, ao mesmo tempo em que repercute em crescimento, sanidade e resistência a estresses. A discussão de Linné et al. (2021), ao situar o silício no manejo de estresses bióticos e abióticos, amplia esse horizonte ao associar o acúmulo do elemento à resposta vegetal contra seca, salinidade, metais pesados, pragas e doenças, sugerindo que sua função agronômica depende da capacidade de integrar reforço estrutural e regulação fisiológica em contextos de instabilidade ambiental. Em cana-energia sob deficiência moderada de ferro, Princi (2022) permite observar que o silício pode participar de ajustes ligados à nutrição mineral e à mitigação de danos, o que indica que seu acúmulo não deve ser lido apenas como aumento de teor nos tecidos, mas como parte de uma reorganização metabólica diante de um desequilíbrio nutricional. Ao mesmo tempo, a comparação entre culturas apresentada por Martins (2010), Oliveira e Abreu Junior (2009) e Carvalho et al. (2003) impede qualquer generalização apressada, pois espécies acumuladoras, intermediárias e pouco acumuladoras respondem de modos distintos à aplicação do elemento, à disponibilidade no solo e às condições de crescimento. Assim, a absorção, o transporte e o acúmulo de silício constituem uma sequência fisiológica integrada, porém não automática, na qual a presença do elemento no solo não garante sua incorporação eficiente, a absorção radicular não assegura elevada deposição foliar e o acúmulo tecidual não produz efeitos homogêneos em todas as culturas; é precisamente nessa cadeia de mediações que o silício adquire sentido agronômico, pois sua utilização em plantas cultivadas depende da leitura conjunta de espécie, cultivar, solo, fonte aplicada, via de fornecimento, estádio fenológico e tipo de estresse, fazendo com que sua função deixe de ser concebida como correção genérica e passe a operar como estratégia fisiológica condicionada pela capacidade da planta de transformar um elemento disponível em resposta anatômica, metabólica e produtiva.

3.2 Aplicação foliar de silício: fundamentos, formas de uso e respostas fisiológicas

A aplicação foliar de silício nas plantas cultivadas deve ser compreendida como uma prática agronômica situada na confluência entre fisiologia vegetal, manejo nutricional e indução de respostas adaptativas, pois não se trata apenas de fornecer um elemento benéfico por via alternativa à absorção radicular, mas de intervir em um sistema biológico cuja eficácia depende da forma química aplicada, da capacidade de penetração cuticular, do estádio fenológico, da espécie vegetal, da arquitetura foliar, das condições ambientais no momento da pulverização e do tipo de estresse ao qual a planta se encontra submetida. Diferentemente da absorção radicular, que insere o silício no fluxo solo, solução, raiz e xilema, a via foliar enfrenta barreiras anatômicas próprias, especialmente a cutícula, a cerosidade epicuticular, a espessura da epiderme, a presença de tricomas, a abertura estomática e a permanência da gota sobre a superfície da folha, de modo que a aplicação foliar não pode ser interpretada como procedimento automaticamente equivalente à adubação silicatada no solo. Oliveira (2009), ao estudar o silício em feijão e arroz, permite perceber que a eficiência de uso do elemento depende da capacidade de absorção, transporte, redistribuição e acúmulo, o que se torna ainda mais complexo quando a entrada ocorre pela superfície foliar, já que a redistribuição interna do silício tende a ser limitada em muitas espécies após sua deposição, restringindo a mobilidade do elemento e exigindo precisão quanto ao momento e à frequência das aplicações. Essa condição técnica tensiona leituras excessivamente generalistas sobre o uso do silício, pois a simples presença do produto na calda de pulverização não assegura incorporação fisiológica suficiente nem deposição funcional nos tecidos-alvo. Quando Cassel et al. (2021) discutem os benefícios da aplicação de silício em plantas, a análise aponta para ganhos associados à rigidez estrutural, à redução de danos provocados por estresses e à melhoria de respostas fisiológicas, mas tais efeitos precisam ser lidos sob a mediação do modo de aplicação, uma vez que a pulverização foliar opera em escala distinta daquela observada na absorção radicular continuada. Santos et al. (2021), ao tratarem do papel do silício nas plantas, também permitem compreender que sua atuação não se esgota na formação de depósitos de sílica, pois envolve ajustes metabólicos, respostas antioxidantes e mecanismos de proteção contra condições adversas, embora esses processos dependam de uma interação efetiva entre o elemento aplicado e os tecidos vegetais. Assim, a aplicação foliar deve ser analisada como tecnologia de manejo cuja racionalidade não reside na expectativa de suplementação indistinta, mas na tentativa de posicionar o silício em momentos críticos do ciclo da planta, especialmente quando a absorção radicular é limitada por baixa disponibilidade no solo, compactação, deficiência hídrica, baixa

atividade radicular ou condições químicas que reduzem a presença de ácido monossilícico na solução do solo. Carvalho et al. (2003), ao investigarem a absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo, reforçam indiretamente essa problemática, pois mostram que o tipo de solo interfere na incorporação do elemento, o que ajuda a explicar por que a via foliar passa a ser considerada em sistemas nos quais o solo não oferece disponibilidade suficiente ou apresenta dinâmica restritiva para o silício. No entanto, essa alternativa não elimina a necessidade de rigor agronômico, pois fonte, concentração, pH da calda, compatibilidade com defensivos, risco de fitotoxicidade, tensão superficial, intervalo entre aplicações e condições meteorológicas definem se a prática produzirá efeito fisiológico ou apenas acréscimo operacional sem retorno mensurável.

As formas de uso do silício por via foliar incluem soluções e suspensões derivadas de fontes solúveis ou parcialmente solúveis, como silicatos estabilizados, ácido silícico, silicato de potássio, formulações comerciais complexadas e produtos associados a bioestimulantes, sendo que cada fonte possui comportamento distinto em termos de solubilidade, estabilidade, absorção, risco de precipitação, compatibilidade em mistura e permanência sobre a lâmina foliar. Essa diversidade exige cautela metodológica, porque estudos que mencionam “aplicação foliar de silício” podem trabalhar com produtos de natureza muito diferente, o que dificulta comparações diretas entre resultados e pode produzir interpretações equivocadas quando se ignora a composição real da fonte utilizada. Martins (2010), ao examinar a cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e arroz, contribui para a crítica dessa generalização, pois demonstra que a capacidade de absorver o elemento varia entre espécies e cultivares, o que implica reconhecer que a resposta à pulverização foliar também tende a depender do material genético, da estrutura foliar e da demanda fisiológica em cada fase do ciclo. Em plantas acumuladoras, como arroz e cana-de-açúcar, a literatura sobre silício frequentemente descreve respostas mais expressivas, ao passo que em espécies de menor acumulação a resposta pode ser mais discreta, localizada ou dependente da pressão de estresse. Oliveira e Abreu Junior (2009), ao discutirem feijão e arroz, oferecem um contraste útil para compreender que a eficiência do silício não pode ser dissociada da identidade fisiológica da cultura, pois o arroz possui comportamento acumulador, enquanto o feijão responde de forma mais limitada, indicando que a aplicação foliar precisa ser interpretada dentro de uma matriz espécie-específica e não como receita universal. No contexto das culturas anuais, como soja, essa advertência se torna ainda mais pertinente, pois a folha funciona

simultaneamente como órgão de interceptação luminosa, troca gasosa, transpiração e recepção da pulverização, de modo que a aplicação foliar de silício pode interferir na superfície de contato entre planta e atmosfera, mas sua resposta agronômica dependerá da capacidade de essa intervenção produzir efeitos sobre estabilidade de membranas, metabolismo antioxidante, relações hídricas e manutenção da fotossíntese sob estresse. Neta et al. (2024), ao analisarem a dinâmica do silício no sistema solo-planta e sua participação no metabolismo e na nutrição, permitem situar a aplicação foliar como parte de um sistema mais amplo, pois a planta não responde apenas ao silício pulverizado, mas ao estado nutricional geral, à disponibilidade hídrica, à estrutura do solo e à intensidade do estresse. Essa compreensão impede que a via foliar seja tratada como solução isolada para limitações estruturais do ambiente de cultivo, sobretudo quando compactação, acidez, baixa fertilidade, déficit hídrico prolongado ou baixa profundidade radicular impõem restrições que não podem ser neutralizadas apenas pela deposição superficial do elemento. Ao mesmo tempo, Linné et al. (2021), ao relacionarem o silício ao manejo de estresses bióticos e abióticos, ajudam a pensar a pulverização foliar como ferramenta de indução ou reforço de tolerância, principalmente quando aplicada antes ou durante a instalação do estresse, pois o efeito tende a ser maior quando a planta ainda possui atividade metabólica suficiente para reorganizar suas respostas fisiológicas. Em termos práticos, isso significa que a aplicação foliar não deve ser concebida apenas como correção tardia de dano já instalado, mas como manejo preventivo ou mitigador, dependente de monitoramento fenológico e ambiental. A crítica central, portanto, não recai sobre a prática em si, mas sobre seu uso descontextualizado, uma vez que o silício pode participar de mecanismos de defesa e de regulação, mas sua eficácia foliar depende de dosagem, fonte, momento, repetição, ambiente, cultivar e integração com o manejo de solo, água e nutrição.

As respostas fisiológicas associadas à aplicação foliar de silício envolvem, em diferentes graus, alterações na transpiração, na condutância estomática, na eficiência fotossintética, na integridade de membranas, no acúmulo de compostos antioxidantes, na atividade de enzimas relacionadas à neutralização de espécies reativas de oxigênio e na resistência estrutural dos tecidos, embora tais respostas não devam ser tomadas como efeitos automáticos ou homogêneos. Em situações de estresse hídrico, por exemplo, a deposição de silício em tecidos foliares pode contribuir para reduzir perdas excessivas de água, preservar a estabilidade epidérmica, modular a abertura estomática e atenuar danos oxidativos decorrentes da limitação de CO_2 e do desequilíbrio fotoquímico, mas esses

mecanismos dependem da intensidade e da duração do déficit, do estado nutricional da planta e da quantidade efetivamente absorvida ou retida nos tecidos. Santos et al. (2021) discutem o papel do silício nas plantas em relação à proteção contra estresses, mas essa proteção precisa ser interpretada como resultado de múltiplas mediações bioquímicas e anatômicas, e não como simples barreira física depositada sobre a folha. Princi (2022), ao analisar o uso do silício na atenuação de danos causados pela deficiência moderada de ferro em cana-energia, amplia essa compreensão ao indicar que o elemento pode interferir em condições de desequilíbrio nutricional, sugerindo que sua atuação fisiológica envolve ajustes no metabolismo mineral e na capacidade de a planta reorganizar processos internos diante de uma limitação específica. Esse ponto é relevante para a interpretação da aplicação foliar porque a folha, além de receber a pulverização, é o principal espaço visível das respostas fisiológicas ao estresse, manifestando clorose, redução de expansão, perda de turgor, senescência, alterações fotossintéticas e danos oxidativos. Cassel et al. (2021), ao reunirem efeitos benéficos do silício, apontam para respostas associadas à maior tolerância das plantas, mas a leitura crítica dessas respostas exige distinguir entre aumento real de tolerância, efeito indireto decorrente de melhoria nutricional, variação genética entre cultivares e influência das condições experimentais. Em experimentos controlados, as respostas podem aparecer com maior nitidez porque as fontes de variação são reduzidas, enquanto em campo a resposta foliar ao silício pode ser obscurecida por irregularidade de chuvas, heterogeneidade do solo, pressão de pragas, compactação, variação na tecnologia de aplicação e diferenças microclimáticas dentro do dossel. Carvalho et al. (2003), ao demonstrarem que Latossolo e Cambissolo influenciam absorção e translocação em eucalipto, permitem transpor para a via foliar uma advertência metodológica: nenhuma resposta vegetal ao silício é independente do ambiente de cultivo, ainda que a entrada do elemento não ocorra diretamente pelo solo. No caso de plantas cultivadas em solos tropicais, especialmente sob baixa disponibilidade de água, a aplicação foliar pode funcionar como prática complementar à construção de um sistema radicular eficiente, mas não substitui o manejo físico-hídrico do solo nem a correção de restrições químicas que limitam a absorção de nutrientes e a sustentação do crescimento. Oliveira (2009), ao articular absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio em feijão e arroz, permite concluir dentro do próprio movimento analítico que o silício só adquire significado fisiológico quando atravessa a condição de insumo aplicado e se converte em componente ativo da resposta vegetal, seja por deposição, por interação com metais, por modulação antioxidante ou por alteração do equilíbrio metabólico. Desse

modo, a aplicação foliar de silício deve ser compreendida como estratégia tecnicamente promissora, mas dependente de critérios agronômicos rigorosos, pois sua eficácia não decorre da crença genérica no efeito benéfico do elemento, e sim da compatibilidade entre fonte, via de aplicação, estádio fenológico, espécie, cultivar, ambiente e estresse predominante; quando essa compatibilidade é negligenciada, a pulverização tende a ser reduzida a procedimento de manejo sem densidade fisiológica, enquanto, quando articulada ao conhecimento da dinâmica do silício no sistema planta e ao diagnóstico das limitações reais do cultivo, ela pode contribuir para reorganizar respostas hídricas, nutricionais e metabólicas em condições nas quais a planta precisa manter atividade fotossintética, integridade celular e crescimento reprodutivo sob pressão ambiental.

4. APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO NA TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO EM SOJA CULTIVADA EM LATOSSOLO VERMELHO

A aplicação foliar de silício na tolerância ao estresse hídrico em soja cultivada em Latossolo Vermelho deve ser analisada como uma prática de manejo que se insere em um sistema de condicionamentos fisiológicos, edáficos e tecnológicos, e não como uma intervenção isolada capaz de neutralizar, por si mesma, os efeitos do déficit de água sobre o metabolismo vegetal. Em Latossolos Vermelhos, marcados por elevado grau de intemperismo, baixa reserva natural de bases em muitos contextos, forte presença de óxidos de ferro e dinâmica físico-hídrica dependente do manejo estrutural do perfil, a disponibilidade de silício na solução do solo tende a não acompanhar necessariamente a demanda fisiológica das plantas, sobretudo quando a cultura enfrenta períodos de restrição hídrica que reduzem o fluxo de massa, a atividade radicular e a absorção de nutrientes e elementos benéficos. Nesse cenário, a via foliar aparece como alternativa técnica porque contorna parcialmente as limitações da interface solo-raiz, mas essa possibilidade precisa ser compreendida com cautela, pois Oliveira (2009), ao discutir absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio em feijão e arroz, demonstra que a simples oferta do silício não garante sua movimentação funcional no interior da planta, já que espécies distintas apresentam capacidades muito diferentes de absorver, translocar e acumular o elemento. Essa observação é particularmente sensível para a soja, que não é classicamente descrita como espécie altamente acumuladora de silício quando comparada ao arroz ou à cana-de-açúcar, de modo que a aplicação foliar deve ser interpretada menos como tentativa de elevar maciçamente o teor total do elemento na planta e mais como estratégia de indução localizada de respostas fisiológicas capazes de

atenuar danos produzidos pelo déficit hídrico. A contribuição de Martins (2010), ao tratar da cinética de absorção de silício em cultivares de cana-de-açúcar e arroz, reforça essa leitura ao indicar que a eficiência de incorporação do elemento depende de características genéticas e fisiológicas, o que impede transferir mecanicamente resultados obtidos em culturas acumuladoras para a soja sem considerar arquitetura foliar, permeabilidade cuticular, estádio fenológico, fonte aplicada e intensidade do estresse. No cultivo em Latossolo Vermelho, essa mediação torna-se ainda mais complexa porque a planta submetida à seca não responde apenas à presença ou ausência de silício, mas ao conjunto de restrições impostas pelo solo, como disponibilidade de água no perfil, resistência mecânica ao aprofundamento radicular, distribuição de poros, fertilidade construída e capacidade de manutenção da atividade biológica. Carvalho et al. (2003), ao compararem absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo, permitem compreender que a natureza do solo interfere diretamente no comportamento do elemento, e essa constatação serve de advertência para experimentos com soja, pois mesmo quando o silício é aplicado via folha, a condição edáfica continua regulando o vigor radicular, o estado hídrico da planta, a transpiração e a possibilidade de resposta metabólica. Desse modo, a aplicação foliar de silício em soja sob estresse hídrico não deve ser apresentada como correção autônoma da deficiência de água, mas como uma prática complementar que pode atuar sobre a estabilidade dos tecidos, a integridade das membranas, a modulação da transpiração e a redução de danos oxidativos, desde que o ambiente de cultivo ofereça condições mínimas para que a planta mantenha metabolismo ativo e consiga converter o estímulo recebido em resposta fisiológica mensurável.

A tolerância ao estresse hídrico em soja envolve uma cadeia de respostas que atravessa fechamento estomático, redução da expansão foliar, alteração na assimilação de carbono, acúmulo de espécies reativas de oxigênio, mudanças na arquitetura radicular, redistribuição de fotoassimilados e possível comprometimento do florescimento, da fixação de vagens e do enchimento de grãos, de modo que o silício aplicado por via foliar precisa ser situado nessa fisiologia da restrição, e não em uma lógica simplificada de fertilização suplementar. Santos et al. (2021), ao examinarem o papel do silício nas plantas, associam o elemento a mecanismos de proteção estrutural e bioquímica, mas tal associação exige leitura crítica, pois a presença do silício pode favorecer a atenuação do estresse sem eliminar a causa primária da limitação, que no caso do déficit hídrico permanece vinculada à insuficiência de água disponível para sustentar transpiração, turgescência e fotossíntese. Na superfície foliar, o silício pode contribuir para modificar

a relação entre a folha e a atmosfera, seja pela deposição de compostos silicatados em tecidos epidérmicos, seja pela influência indireta sobre a regulação estomática e sobre a manutenção da integridade celular, mas essas respostas dependem da forma química aplicada, da capacidade de penetração ou retenção sobre a cutícula, da frequência das pulverizações e do momento fenológico em que a soja recebe o tratamento. Cassel et al. (2021), ao sistematizarem benefícios da aplicação de silício em plantas, discutem respostas associadas à redução de efeitos de estresses bióticos e abióticos, porém a transposição dessa literatura para a soja em Latossolo Vermelho exige considerar que o estresse hídrico em campo raramente ocorre de modo isolado, pois frequentemente se combina com temperatura elevada, compactação, baixa umidade nas camadas exploráveis, restrição nutricional e variação espacial da estrutura do solo. Neta et al. (2024), ao tratarem da dinâmica do silício no sistema solo-planta e de sua participação no metabolismo e na nutrição, contribuem para deslocar a interpretação do silício de um insumo de efeito direto para um componente de interação sistêmica, pois o elemento atua em uma rede na qual absorção, transporte, acúmulo, disponibilidade edáfica, estado nutricional e metabolismo vegetal se condicionam reciprocamente. Em uma lavoura de soja conduzida em Latossolo Vermelho, essa rede pode assumir configurações distintas conforme o histórico de manejo do solo, a correção da acidez, a presença de palhada, a infiltração de água, a profundidade efetiva explorada pelas raízes e a ocorrência de déficit hídrico em fases vegetativas ou reprodutivas. Linné et al. (2021), ao abordarem o silício no manejo de estresses bióticos e abióticos, permitem compreender a pulverização foliar como prática de indução de tolerância, especialmente quando utilizada de forma preventiva ou no início da imposição do estresse, e não apenas como resposta tardia a danos já instalados. Essa distinção é agronomicamente decisiva, pois uma planta de soja que já apresenta senescência acelerada, desorganização fotossintética e queda irreversível de estruturas reprodutivas tende a responder menos ao silício do que uma planta ainda metabolicamente ativa, capaz de reorganizar seus mecanismos antioxidantes e preservar parcialmente sua atividade fotossintética. Princi (2022), ao investigar o uso do silício na atenuação de danos causados por deficiência moderada de ferro em cana-energia, embora em cultura e estresse diferentes, oferece uma chave interpretativa útil porque situa o silício como modulador de desordens fisiológicas, e não como elemento de ação única; nesse sentido, sua aplicação foliar em soja sob seca deve ser lida como intervenção capaz de dialogar com sistemas antioxidantes, nutrição mineral e homeostase celular, mas sem substituir a disponibilidade hídrica, a fertilidade do solo e a adequação do manejo.

Portanto, quando se discute tolerância ao déficit hídrico, a eficiência do silício depende de sua inserção em um arranjo agronômico coerente, no qual a pulverização foliar se articula com manejo de solo, escolha de cultivar, época de semeadura, conservação da umidade, cobertura vegetal e redução de impedimentos físicos ao aprofundamento radicular.

A análise crítica da aplicação foliar de silício em soja cultivada em Latossolo Vermelho exige reconhecer simultaneamente seu potencial fisiológico e seus limites experimentais, pois muitos estudos sobre silício trabalham com espécies acumuladoras, condições controladas ou estresses artificialmente impostos, ao passo que a soja em campo responde a um conjunto de variáveis menos controláveis, nas quais o efeito isolado do elemento pode ser mascarado ou amplificado por fatores edáficos, climáticos e genéticos. Oliveira e Abreu Junior (2009), ao discutirem o silício em plantas de feijão e arroz, permitem observar que a resposta vegetal ao elemento é dependente da cultura, e essa constatação impede afirmar que a soja terá comportamento equivalente ao arroz, especialmente quanto ao acúmulo e à redistribuição interna após aplicação. Ainda assim, a menor capacidade acumuladora não inviabiliza a hipótese de resposta fisiológica, pois a aplicação foliar pode atuar em tecidos diretamente expostos ao déficit atmosférico e ao aumento da demanda evaporativa, contribuindo para preservar a estabilidade de membranas, reduzir peroxidação lipídica, manter teor relativo de água e favorecer menor colapso da atividade fotossintética em períodos de seca moderada. Oliveira (2009), ao relacionar silício e tolerância ao cádmio, indica que o elemento pode participar da mitigação de estresses por vias que envolvem compartimentalização, barreiras anatômicas e redução de danos oxidativos, e essa lógica pode ser transposta criticamente para o estresse hídrico na medida em que a seca também desencadeia desequilíbrios oxidativos e perturbações metabólicas, embora por mecanismos distintos daqueles associados à toxicidade metálica. Em soja, a fase reprodutiva torna essa discussão ainda mais sensível, pois a limitação hídrica durante florescimento, formação de vagens e enchimento de grãos pode comprometer a produtividade mesmo quando o crescimento vegetativo anterior foi satisfatório; nesse ponto, a aplicação foliar de silício teria maior coerência técnica se posicionada em estádios nos quais a manutenção da atividade fotossintética e da integridade foliar possa sustentar a alocação de assimilados aos órgãos reprodutivos. Cassel et al. (2021) tratam os efeitos benéficos do silício de modo amplo, mas a leitura aplicada à soja exige distinguir benefício fisiológico localizado de ganho agronômico efetivo, pois alterações em enzimas antioxidantes, teor de clorofila ou

condutância estomática não se convertem automaticamente em maior rendimento de grãos quando o déficit hídrico é severo, prolongado ou acompanhado de baixa exploração radicular do Latossolo. A própria dinâmica descrita por Neta et al. (2024) no sistema solo-planta reforça que o silício precisa ser pensado em interação com o ambiente, e não como produto de resposta invariável, já que uma lavoura em Latossolo Vermelho compactado, com baixa infiltração e raízes confinadas, tende a apresentar restrições mais profundas do que aquelas que a pulverização foliar consegue compensar. Santos et al. (2021), ao discutirem a atuação do silício nas plantas, oferecem suporte para compreender seus efeitos na resistência a estresses, mas o uso agronômico consistente exige avaliar dose, fonte, tecnologia de aplicação, momento fenológico, cultivar, severidade da seca e indicadores fisiológicos e produtivos em conjunto. Martins (2010), ao enfatizar diferenças cinéticas entre cultivares e espécies, ajuda a sustentar que experimentos com soja deveriam comparar genótipos, fontes foliares e condições de disponibilidade hídrica em Latossolo Vermelho para evitar conclusões genéricas baseadas em respostas médias pouco explicativas. Carvalho et al. (2003), ao demonstrarem que o tipo de solo influencia a absorção e a translocação de silício, acrescentam que o Latossolo não pode aparecer apenas como cenário experimental, pois sua composição, seu manejo e sua estrutura interferem no estado fisiológico da planta e, portanto, na própria possibilidade de resposta à aplicação foliar. Assim, a aplicação foliar de silício na soja sob estresse hídrico em Latossolo Vermelho deve ser compreendida como estratégia de mitigação condicionada, capaz de contribuir para a preservação parcial de processos fisiológicos sob déficit moderado e bem manejado, mas insuficiente para compensar sistemas edáficos degradados, déficit hídrico extremo ou manejo agronômico desconectado das exigências da cultura; sua pertinência científica e técnica reside justamente nessa zona de mediação, em que o silício não opera como solução autônoma, mas como componente de uma arquitetura de manejo que procura sustentar a atividade metabólica da soja, reduzir danos celulares e ampliar a capacidade da planta de atravessar períodos de limitação hídrica sem converter imediatamente a restrição ambiental em perda produtiva irreversível.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações desenvolvidas ao longo deste trabalho permitem afirmar que o problema central da pesquisa, relativo ao efeito da aplicação foliar de silício na tolerância ao estresse hídrico em plantas de soja cultivadas em Latossolo Vermelho, não pode ser respondido por uma lógica causal simples, como se a pulverização do elemento

produzisse, de modo automático, uma condição generalizada de resistência vegetal à limitação de água. A análise conduzida indica que a questão se situa em um campo de mediações complexas, no qual a fisiologia da soja, a disponibilidade hídrica, a natureza físico-química do Latossolo Vermelho, a via de fornecimento do silício, o estádio fenológico da cultura e a intensidade do déficit interagem de modo simultâneo, produzindo respostas que variam conforme o sistema de cultivo e o estado metabólico da planta no momento da aplicação. Nesse sentido, o objetivo de compreender a relação entre o silício foliar e a tolerância da soja ao estresse hídrico foi retomado não como tentativa de atribuir ao elemento uma função isolada, mas como esforço de interpretação de sua inserção em um arranjo agronômico mais amplo, no qual o solo não figura apenas como substrato físico e a planta não aparece como receptora passiva de insumos, mas como organismo que reorganiza suas trocas gasosas, sua absorção de água, sua integridade celular e sua alocação de fotoassimilados diante de condições ambientais restritivas. A soja, por sua constituição botânica e fisiológica, responde ao déficit hídrico mediante ajustes que envolvem fechamento estomático, redução da expansão foliar, alterações na fotossíntese, mudanças no metabolismo oxidativo e possível comprometimento das fases reprodutivas, de modo que a aplicação foliar de silício pode adquirir sentido quando contribui para atenuar parte desses processos, sobretudo pela preservação relativa da estrutura foliar, pela redução de danos oxidativos, pela possível modulação da perda de água e pela manutenção parcial da atividade metabólica em situações de estresse moderado. Entretanto, essa resposta não deve ser confundida com eliminação da restrição hídrica, pois o silício não substitui água, não corrige sozinho impedimentos físicos do solo, não resolve a baixa profundidade efetiva explorada pelas raízes e não anula os efeitos de manejo inadequado sobre a disponibilidade de recursos no perfil. Assim, a pergunta de pesquisa encontra uma resposta analítica condicionada: a aplicação foliar de silício pode contribuir para ampliar a tolerância da soja ao estresse hídrico em Latossolo Vermelho quando integrada a um sistema de manejo que assegure condições mínimas de vigor radicular, nutrição equilibrada, estrutura física adequada e aplicação em momento fisiologicamente oportuno, mas sua eficácia tende a ser limitada quando utilizada como procedimento isolado diante de déficits severos, compactação acentuada, baixa fertilidade, desorganização hídrica do solo ou escolha inadequada de cultivar e estádio de aplicação.

A rearticulação dos objetivos propostos permite reconhecer que a investigação alcançou uma compreensão integrada entre três dimensões que, embora frequentemente

tratadas separadamente, constituem uma mesma rede explicativa: a natureza agronômica da soja, a condição edáfica do Latossolo Vermelho e a fisiologia do silício nas plantas cultivadas. A caracterização da soja demonstrou que sua resposta produtiva decorre da articulação entre arquitetura radicular, área foliar, metabolismo fotossintético, duração das fases fenológicas, formação de vagens e enchimento de grãos, sendo particularmente sensível à disponibilidade de água em momentos críticos do ciclo. A análise do Latossolo Vermelho, por sua vez, permitiu compreender que a aptidão desse solo para a sojicultura não deriva apenas de sua profundidade ou de sua ampla ocorrência em áreas agrícolas, mas da qualidade construída pelo manejo, pois compactação, baixa macroporosidade, acidez subsuperficial, baixa disponibilidade natural de nutrientes e variabilidade espacial de atributos físicos podem restringir a exploração radicular e intensificar os efeitos do déficit hídrico. O exame do silício acrescentou outra camada interpretativa ao demonstrar que sua absorção, transporte e acúmulo dependem da espécie, da fonte, da via de fornecimento, da disponibilidade no ambiente e da capacidade fisiológica da planta de converter o elemento aplicado em resposta funcional. A partir dessa integração, os principais achados assumem caráter crítico: a aplicação foliar de silício possui potencial para atuar sobre mecanismos de tolerância, mas esse potencial não se realiza de maneira uniforme, pois depende da interação entre o elemento e uma planta metabolicamente apta a responder ao estímulo. Em termos fisiológicos, a contribuição do silício relaciona-se à estabilidade dos tecidos, à possível redução de transpiração excessiva, à mitigação de danos oxidativos, à manutenção da integridade de membranas e à preservação parcial da fotossíntese sob restrição hídrica; em termos agronômicos, sua pertinência depende de aplicação tecnicamente ajustada e compatível com o manejo do solo, da água e da nutrição; em termos edáficos, sua efetividade não pode ser dissociada das condições do Latossolo Vermelho, pois um solo compactado, mal estruturado ou quimicamente restritivo impõe limitações que excedem a capacidade compensatória de uma pulverização foliar. Desse modo, o estudo contribui para deslocar a compreensão do silício de uma perspectiva meramente insumista para uma abordagem sistêmica, na qual o elemento é interpretado como mediador fisiológico e não como solução autônoma, evitando tanto a negação apriorística de seu uso quanto sua celebração acrítica como tecnologia universal de tolerância ao estresse.

No plano teórico, a pesquisa contribui ao articular campos de conhecimento que muitas vezes permanecem fragmentados nas análises agronômicas, especialmente quando os estudos separam a fisiologia da planta, a ciência do solo e o manejo de insumos foliares

em unidades explicativas independentes. A discussão demonstrou que a tolerância ao estresse hídrico não pode ser reduzida a um atributo intrínseco da cultivar nem a uma resposta direta a determinado produto aplicado, pois se constitui como fenômeno relacional, dependente da interação entre genótipo, ambiente, estado hídrico, metabolismo, estrutura do solo e práticas de manejo. A aplicação foliar de silício, nesse enquadramento, aparece como uma estratégia de modulação fisiológica cuja relevância reside menos na quantidade absoluta do elemento fornecido e mais na possibilidade de alterar respostas celulares e anatômicas em momentos de vulnerabilidade da cultura. Essa leitura permite refinar a interpretação dos mecanismos de tolerância, pois indica que preservar a fotossíntese, reduzir danos oxidativos, manter maior estabilidade de membranas ou sustentar a atividade foliar durante períodos de déficit não são efeitos isolados, mas expressões de um equilíbrio complexo entre a capacidade da planta de conservar água, regular trocas gasosas, manter integridade estrutural e continuar alocando assimilados para órgãos reprodutivos. No plano prático, o estudo oferece subsídios para que a aplicação foliar de silício seja pensada como componente de programas de manejo voltados a ambientes sujeitos à irregularidade hídrica, especialmente em Latossolos Vermelhos cuja produtividade depende da construção continuada de qualidade física, química e biológica. A utilização agronômica do silício, nesse sentido, deve ser planejada a partir do diagnóstico do sistema produtivo, incluindo textura e estrutura do solo, histórico de compactação, profundidade efetiva explorada pelas raízes, disponibilidade hídrica, cultivar empregada, estádio fenológico, fonte silicatada, dose, tecnologia de aplicação e probabilidade de ocorrência de estresse. A prática torna-se mais coerente quando associada à cobertura do solo, à rotação de culturas, à correção da acidez, à manutenção de matéria orgânica, à redução do tráfego em condições inadequadas de umidade e à escolha de cultivares com maior estabilidade fisiológica. Com isso, a contribuição prática do trabalho não consiste em recomendar o silício como resposta isolada à seca, mas em situá-lo dentro de uma racionalidade de manejo integrado, na qual sua aplicação pode auxiliar a planta a atravessar períodos de restrição hídrica com menor desorganização fisiológica, desde que o ambiente radicular e o sistema de produção não estejam estruturalmente comprometidos.

As limitações da pesquisa também precisam ser reconhecidas como parte constitutiva de sua maturidade analítica, pois a discussão, ao se apoiar em literatura sobre silício em diferentes culturas e condições experimentais, enfrenta o desafio de transpor criticamente achados produzidos em espécies acumuladoras, em ambientes controlados

ou em sistemas edáficos distintos para a realidade específica da soja cultivada em Latossolo Vermelho sob estresse hídrico. Essa limitação não invalida a análise, mas impede generalizações lineares, sobretudo porque a soja apresenta comportamento diferenciado em relação ao acúmulo de silício quando comparada a culturas como arroz e cana-de-açúcar, além de responder ao déficit hídrico de maneira dependente do estádio fenológico, da cultivar e da intensidade da restrição. Outra limitação consiste na heterogeneidade das fontes de silício disponíveis, pois formulações foliares distintas podem apresentar solubilidade, estabilidade, absorção, compatibilidade e efeitos fisiológicos muito variados, o que dificulta comparações diretas quando os estudos não descrevem adequadamente composição, dose, pH da calda, intervalo de aplicação, tecnologia de pulverização e condições meteorológicas. Também se reconhece que a tolerância ao estresse hídrico deve ser mensurada por um conjunto amplo de indicadores, e não apenas por produtividade final, já que respostas como teor relativo de água, condutância estomática, fluorescência da clorofila, atividade antioxidante, peroxidação lipídica, acúmulo de biomassa, profundidade radicular e componentes de rendimento permitem compreender com maior precisão os mecanismos envolvidos. A partir dessas limitações, pesquisas futuras devem avançar em experimentos de campo conduzidos em Latossolos Vermelhos com diferentes níveis de compactação, fertilidade e disponibilidade hídrica, comparando cultivares de soja, fontes foliares de silício, doses, épocas de aplicação e regimes de déficit hídrico controlado, de modo a distinguir respostas fisiológicas transitórias de ganhos agronômicos efetivos. Também se abre caminho para estudos que integrem análises de solo, planta e atmosfera, incorporando sensores de umidade, avaliação radicular em profundidade, indicadores bioquímicos de estresse e monitoramento fenológico detalhado, pois somente uma abordagem multiescalar poderá explicar em que condições o silício foliar atua como mediador de tolerância e em que circunstâncias sua aplicação se torna tecnicamente insuficiente. Assim, a conclusão que se impõe não encerra o tema em uma afirmação simplificada de eficácia ou ineficácia, mas situa a aplicação foliar de silício como possibilidade agronômica condicionada, cuja validade científica depende da compreensão das mediações entre solo, planta, água e manejo, e cuja utilidade prática se realiza quando a tecnologia deixa de ser tratada como insumo milagroso e passa a integrar uma estratégia de produção capaz de reconhecer a complexidade fisiológica da soja e a materialidade edáfica do Latossolo Vermelho.

REFERÊNCIAS

BICALHO, Thaís Ferreira. Influência da época de semeadura em caracteres agronômicos, adaptabilidade e estabilidade de cultivares de soja. 2018. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018

CARVALHO, Ruy et al. Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 3, p. 491-500, 2003

CARVALHO, Ruy et al. Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 3, p. 491-500, 2003

CASSEL, Júlia Letícia et al. Benefícios da aplicação de silício em plantas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021

CASSEL, Júlia Letícia et al. Benefícios da aplicação de silício em plantas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021

GIAROLA, Neyde Fabíola Balarezo et al. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 641-646, 2009

GIRARDELLO, Vitor Cauduro et al. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2115-2126, 2011

GONÇALVES, André Luiz. Uso de Bacillus velezensis na produção de bioativos para o engalhamento da soja. 2025. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Bioinsumos) – Instituto Federal Goiano, Campus Cristalina, Cristalina, 2025

HOLLENBACH, Clarissa Boemler. Estudo da toxicidade reprodutiva de duas formulações fitoterápicas comerciais contendo soja (Glycine max (L.) Merr) em ratos wistar. 2008

LARA LEDESMA, Stalin Estuardo. Evaluación de varios bioestimulantes foliares en la producción del cultivo de soya (Glycine max L.) en la zona de Babahoyo provincia de Los Ríos. 2009. 112 f. Tesis de grado (Ingeniería Agropecuaria) – Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009

LINNÉ, Jéssica Aline et al. O silício no manejo de estresses bióticos e abióticos. In: Manejo e produção sustentável. Volume II. Local: Editora não informada, ano não informado

LINNÉ, Jéssica Aline et al. O silício no manejo de estresses bióticos e abióticos. In: Manejo e produção sustentável. Volume II. Local: Editora não informada, ano não informado

MARTINS, Priscila Oliveira. Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz. 2010. Trabalho acadêmico – Instituição não informada, 2010

MARTINS, Priscila Oliveira. Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz. 2010. Trabalho acadêmico – Instituição não informada, 2010

MONTANARI, Rafael; MÁRIO, Nilton Eugénio; QUEIROZ, Hernandes Andrade. Variabilidade espacial de atributos físicos num Latossolo Vermelho sob plantio direto com rotação de culturas. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 12, p. 85, 2024

NASCIMENTO, Athos Gabriel Gonçalves. Análise dialélica, correlações e divergência genética em soja para fins de seleção de genitores. 2021. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021

NETA, Francisca Xavier Quintino et al. Dinâmica do silício no sistema solo planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 9, p. e6671, 2024

NETA, Francisca Xavier Quintino et al. Dinâmica do silício no sistema solo planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 9, p. e6671, 2024

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004

OLIVEIRA, Lilian Aparecida de. Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009

OLIVEIRA, Lilian Aparecida de. Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009

OLIVEIRA, Lílian Aparecida; ABREU JUNIOR, Cassio Hamilton. Silício em plantas de feijão e arroz. 2009. Trabalho acadêmico – Instituição não informada, 2009

OLIVEIRA, Lílian Aparecida; ABREU JUNIOR, Cassio Hamilton. Silício em plantas de feijão e arroz. 2009. Trabalho acadêmico – Instituição não informada, 2009

OLIVEIRA, Paula Regina de et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 587-597, 2012

PEREIRA, Matheus Batista Néri; MORAES, Moacir Tuzzin de. Contribuição do uso de braquiária na fertilidade de um Latossolo Vermelho para o aprofundamento radicular de soja. 2025. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2025

PRINCI, Murilo Bassan. Uso do silício na atenuação dos danos causados pela deficiência moderada de ferro em plantas de cana-energia. 2022. Trabalho acadêmico – Instituição não informada, 2022

PRINCI, Murilo Bassan. Uso do silício na atenuação dos danos causados pela deficiência moderada de ferro em plantas de cana-energia. 2022. Trabalho acadêmico – Instituição não informada, 2022

ROCHA, Mayara Oliveira. Identificação de ambiente propício à hibridação da soja no Ceará. 2017. 49 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017

SANTOS, Diego dos et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 843-848, 2012

SANTOS, Leônidas Canuto dos et al. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e3810716247, 2021

SANTOS, Leônidas Canuto dos et al. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e3810716247, 2021

SILVA, José Artur. Descritores fisiológicos e agronômicos de cultivares de amendoim em condições semiáridas. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022

SOUZA, Advaldo Graciano Pinheiro de. Desempenho agronômico da soja (Glycine max L.), cultivar UFV1 sob diferentes densidades de semeadura, em condições edafoclimáticas do Vale do Canaã, Santa Teresa-ES. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Santa Teresa, 2024

SPERA, Silvio Tulio et al. Atributos químicos restritivos de Latossolo Vermelho distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **Agrarian**, v. 4, n. 14, p. 324-334, 2011