

NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS SOB ESTRESSES CLIMÁTICOS: ESTRATÉGIAS PARA MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA NO USO DE NUTRIENTES EM SISTEMAS AGRÍCOLAS TROPICAIS

**MINERAL NUTRITION OF PLANTS UNDER CLIMATIC STRESSES:
STRATEGIES FOR MAXIMIZING NUTRIENT USE EFFICIENCY IN TROPICAL
AGRICULTURAL SYSTEMS**

Ciências Biológicas, Ciências Agrárias, Engenharias • 30/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/785195126](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/785195126)

Igor Madruga de Oliveira¹

RESUMO

Este estudo apresenta uma revisão bibliográfica abrangente sobre os complexos impactos das alterações climáticas na dinâmica de absorção, transporte e utilização de nutrientes pelas plantas, com foco estrito nos sistemas agrícolas desenvolvidos em regiões tropicais. A intensificação de eventos climáticos extremos, caracterizada por episódios severos de déficit hídrico, elevação persistente das temperaturas médias globais e drástica irregularidade pluviométrica, impõe desafios sem precedentes à segurança alimentar e à sustentabilidade da produção agrícola. Neste cenário, a nutrição mineral de plantas deixa de ser apenas um fator de incremento de produtividade e passa a ser uma ferramenta central de mitigação de estresses abióticos. O objetivo primário desta pesquisa é investigar como as variáveis climáticas afetam a físico-química do solo, a biologia da rizosfera e a fisiologia do sistema radicular, comprometendo processos vitais como o fluxo de massa, a difusão iônica e a absorção ativa dependente de energia. Secundariamente, o estudo compila, avalia e discute as principais estratégias de manejo agrônômico capazes de reduzir as perdas nutricionais e maximizar a eficiência no uso de nutrientes. A metodologia baseia-se em uma análise sistemática da literatura científica contemporânea e clássica, integrando dados de fisiologia vegetal, fertilidade do solo e climatologia agrícola. Os resultados sintetizados evidenciam que a restrição hídrica não apenas paralisa o transporte de elementos móveis como o nitrogênio, mas também agrava a fixação de fósforo em solos intemperizados. Paralelamente, o estresse térmico compromete a integridade das membranas celulares radiculares, gerando estresse oxidativo que desnatura enzimas fundamentais para a assimilação de nutrientes, enquanto chuvas torrenciais promovem a lixiviação acelerada de cátions e ânions essenciais. A discussão aponta que a resiliência dos sistemas

tropicais depende da adoção de práticas integradas que transcendem a adubação convencional. O uso estratégico de fertilizantes de liberação controlada, a construção do perfil do solo, a manutenção do plantio direto com alta deposição de palhada, a aplicação de elementos benéficos como silício para osmorregulação e defesa antioxidante, e a intensificação das interações simbióticas com fungos micorrízicos e rizobactérias promotoras de crescimento emergem como soluções indispensáveis. Conclui-se que a maximização da eficiência nutricional sob condições de mudanças climáticas exige uma transição de manejos reativos para estratégias preditivas, biológicas e sistêmicas, garantindo a estabilidade produtiva, a rentabilidade econômica e a preservação ambiental no ambiente tropical.

Palavras-chave: Nutrição vegetal; Estresse abiótico; Eficiência nutricional; Mudanças climáticas; Agricultura tropical; Fisiologia do estresse; Dinâmica de nutrientes.

ABSTRACT

This study presents a comprehensive literature review on the complex impacts of climate change on the dynamics of nutrient absorption, transport, and utilization by plants, with a strict focus on agricultural systems developed in tropical regions. The intensification of extreme weather events, characterized by severe episodes of water deficit, persistent elevation of global average temperatures, and drastic rainfall irregularity, imposes unprecedented challenges on food security and the sustainability of agricultural production. In this scenario, plant mineral nutrition ceases to be merely a yield-increasing factor and becomes a central tool for mitigating abiotic stresses. The primary objective of this research is to investigate how climatic variables affect soil physical chemistry, rhizosphere biology, and root system physiology,

compromising vital processes such as mass flow, ionic diffusion, and energy-dependent active absorption. Secondly, the study compiles, evaluates, and discusses the main agronomic management strategies capable of reducing nutritional losses and maximizing nutrient use efficiency. The methodology is based on a systematic analysis of contemporary and classical scientific literature, integrating data from plant physiology, soil fertility, and agricultural climatology. The synthesized results show that water restriction not only halts the transport of mobile elements such as nitrogen but also exacerbates phosphorus fixation in weathered soils. Concurrently, heat stress compromises the integrity of root cell membranes, generating oxidative stress that denatures key enzymes for nutrient assimilation, while torrential rains promote the accelerated leaching of essential cations and anions. The discussion indicates that the resilience of tropical systems depends on the adoption of integrated practices that transcend conventional fertilization. The strategic use of controlled-release fertilizers, soil profile building, the maintenance of no-till farming with high crop residue deposition, the application of beneficial elements such as silicon for osmoregulation and antioxidant defense, and the intensification of symbiotic interactions with mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria emerge as indispensable solutions. It is concluded that maximizing nutritional efficiency under conditions of climate change requires a transition from reactive management to predictive, biological, and systemic strategies, ensuring yield stability, economic profitability, and environmental preservation in the tropical environment.

Keywords: Plant nutrition; Abiotic stress; Nutritional efficiency; Climate change; Tropical agriculture; Stress physiology; Nutrient dynamics.

1. INTRODUÇÃO

As projeções climáticas globais delineiam um cenário de transformações drásticas, aceleradas e, em muitos aspectos, irreversíveis, que incidem diretamente sobre os alicerces da produção agrícola mundial. O aumento progressivo das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera tem desequilibrado o balanço radiativo da Terra, resultando na elevação das temperaturas médias globais e na profunda alteração dos padrões do ciclo hidrológico. Segundo os relatórios mais recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), eventos climáticos extremos que antes possuíam tempos de recorrência seculares, como secas prolongadas de grande magnitude, ondas de calor severas e precipitações torrenciais concentradas, estão se tornando cada vez mais frequentes e intensos. Esse panorama impõe uma ameaça iminente à segurança alimentar global, afetando de maneira desproporcional as regiões tropicais. Nessas áreas, localizadas predominantemente em países em desenvolvimento, a agricultura desempenha um papel estruturante e insubstituível, não apenas para o abastecimento interno e a balança comercial, mas como pilar de estabilidade social e econômica. Contudo, os sistemas agrícolas tropicais, apesar de sua vasta biodiversidade e potencial produtivo, operam rotineiramente muito próximos aos limites térmicos e hídricos tolerados pelas principais culturas agronômicas.

Neste contexto de instabilidade ambiental crescente, a nutrição mineral de plantas emerge como um dos processos biológicos mais críticos e, paradoxalmente, um dos mais vulneráveis aos estresses abióticos. A nutrição vegetal não pode ser compreendida como um processo estático ou isolado; trata-se de uma dinâmica altamente

complexa que ocorre na interface solo-raiz-atmosfera. A capacidade de uma planta absorver, transportar e assimilar nutrientes de forma eficiente é governada por uma intrincada rede de variáveis físicas, químicas e biológicas que são profundamente sensíveis às flutuações do clima. A eficiência no uso de nutrientes, definida agronomicamente por Fageria (2009) como a capacidade do sistema vegetal em converter os nutrientes aplicados via fertilizantes ou presentes naturalmente no solo em biomassa colhível de valor econômico, tem apresentado declínios preocupantes em safras atingidas por anomalias climáticas. Compreender a gênese dessa ineficiência requer um mergulho profundo na fisiologia vegetal e na termodinâmica dos solos tropicais, pois a falha na nutrição sob estresse raramente decorre da ausência do elemento no solo, mas sim da incapacidade do sistema radicular em acessá-lo e metabolizá-lo adequadamente em condições ambientais subótimas.

As regiões tropicais apresentam características pedológicas únicas que adicionam camadas de complexidade ao desafio da nutrição sob estresse climático. Solos altamente intemperizados, como os Latossolos e Argissolos que predominam no Cerrado e nas franjas amazônicas, são naturalmente ácidos, ricos em óxidos de ferro e alumínio, e possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Esses fatores conferem aos solos tropicais uma elevada capacidade de adsorção e fixação de ânions, especialmente o fósforo, além de um alto potencial de toxidez por alumínio em subsuperfície. Novais et al. (2007) ressaltam que, nessas condições, o sistema radicular tende a se concentrar nas camadas mais superficiais do solo, onde ocorre a correção da acidez e a maior deposição de fertilizantes e matéria orgânica. No entanto, é exatamente essa camada superficial a mais suscetível ao rápido ressecamento durante períodos de

veranico e às temperaturas escaldantes decorrentes da incidência direta da radiação solar. Quando o clima oscila para condições de estresse, a arquitetura radicular superficializada, induzida pela química do solo tropical, torna-se o principal calcanhar de Aquiles das culturas agrícolas, expondo-as de forma severa à deficiência nutricional induzida pela falta de água e pelo excesso de calor.

A fisiologia clássica da nutrição mineral, amplamente descrita por Marschner (2012) e Epstein e Bloom (2006), estabelece que o movimento de nutrientes da solução do solo até a superfície das raízes ocorre fundamentalmente por três mecanismos: fluxo de massa, difusão e interceptação radicular. O fluxo de massa é o movimento de íons dissolvidos na água do solo, impulsionado pelo gradiente de potencial hídrico gerado pela transpiração das folhas. Nutrientes móveis no solo, como o nitrogênio na forma de nitrato, o cálcio e o magnésio, dependem quase inteiramente desse fluxo para alcançar as raízes. Sob condições de déficit hídrico, a disponibilidade de água livre no solo decai drasticamente e, simultaneamente, a planta promove o fechamento estomático para evitar a desidratação, cessando a corrente transpiratória. Como consequência direta, o fluxo de massa é interrompido. A planta pode estar em um solo farto em nitrogênio, mas sofrerá de deficiência aguda porque o veículo de transporte — a água — não está operando adequadamente. Esse fenômeno demonstra claramente como as mudanças nos padrões de precipitação impactam a eficiência da adubação nitrogenada, muitas vezes resultando em plantas cloróticas e atrofiadas mesmo após pesadas aplicações de ureia.

A difusão, por sua vez, é o principal mecanismo de transporte para nutrientes de baixa mobilidade, notadamente o fósforo e o potássio. Esse movimento ocorre a curtas distâncias, impulsionado pelo

gradiente de concentração entre a solução do solo e a rizosfera, onde a absorção ativa cria zonas de depleção. A taxa de difusão é regida pela umidade do solo, pela tortuosidade do caminho poroso e pela temperatura. A restrição hídrica reduz a espessura dos filmes de água ao redor das partículas do solo, aumentando a resistência ao movimento dos íons difusíveis. O fósforo, que já sofre fortes restrições químicas nos solos tropicais devido à fixação em argilominerais, tem seu fornecimento virtualmente paralisado quando o solo seca. Taiz et al. (2017) destacam que a deficiência induzida de fósforo compromete a síntese de ATP, privando a planta da energia necessária para manter a bomba de prótons H^+ -ATPase da membrana plasmática funcionando, o que colapsa a absorção ativa de virtualmente todos os outros minerais. Assim, o estresse hídrico desencadeia um efeito cascata que compromete não apenas o metabolismo hídrico, mas colapsa inteiramente a matriz energética e nutricional do tecido vegetal.

Paralelamente ao déficit hídrico, a elevação das temperaturas e a ocorrência de ondas de calor severas perturbam profundamente a homeostase bioquímica e estrutural das plantas. Wahid et al. (2007) elucidam que a exposição crônica ou aguda ao estresse térmico afeta em primeiro lugar a integridade e a fluidez das membranas biológicas. A bicamada lipídica da membrana plasmática das células radiculares torna-se hiperfluida em altas temperaturas, o que leva à perda de seletividade. Proteínas transmembrana, que atuam como carreadores e canais específicos para o influxo de íons, sofrem alterações conformacionais, perdendo sua afinidade pelos nutrientes. Ocorre, então, o efluxo passivo, onde íons vitais já absorvidos, como o potássio, vazam de volta para a solução do solo. Além disso, o estresse térmico desequilibra as reações de fotossíntese e respiração, levando à superprodução de espécies

reativas de oxigênio (EROs), como o ânion superóxido e o peróxido de hidrogênio. Essas moléculas altamente instáveis atacam lipídios, proteínas e ácidos nucleicos. Enzimas chave para o metabolismo do nitrogênio, como a nitrato redutase e a glutamina sintetase, são rapidamente inativadas pelo estresse oxidativo, paralisando a assimilação de aminoácidos e a formação de proteínas, resultando no colapso do crescimento celular e na senescência foliar prematura.

O extremo oposto do déficit hídrico — a irregularidade pluviométrica marcada por eventos de precipitação excessiva — não é menos deletério para a eficiência nutricional nos trópicos. As tempestades torrenciais, previstas como cada vez mais comuns nos modelos climáticos, promovem a rápida saturação dos macroporos do solo. Elementos de alta mobilidade e com cargas negativas, que não encontram sítios de ligação suficientes nas argilas dos solos intemperizados, são severamente lixiviados para fora do alcance do sistema radicular. A lixiviação de nitratos e sulfatos representa não apenas uma perda econômica imensurável para os produtores e uma causa primária de falha produtiva, mas constitui um vetor de poluição ambiental grave, contribuindo para a eutrofização de águas superficiais e contaminação de aquíferos subterrâneos (Epstein; Bloom, 2006). Quando a inundação persiste e o solo entra em estado de hipóxia ou anoxia temporária, a microbiota benéfica é asfixiada. A ausência de oxigênio induz bactérias desnitrificantes a utilizarem o nitrato comoceptor final de elétrons, convertendo-o em gás nitrogênio e óxido nitroso, que se perdem para a atmosfera, agravando duplamente o cenário: privando a cultura do nutriente e emitindo potentes gases de efeito estufa.

A convergência desses fatores delinea o grau de urgência com que a ciência agronômica deve tratar a nutrição mineral sob o paradigma das mudanças climáticas. Já não é possível conceber planos de fertilização baseados exclusivamente em curvas de extração e exportação calculadas em condições ótimas de clima. A resiliência climática exige uma nova abordagem conceitual, na qual a nutrição vegetal atue ativamente como o mecanismo central de tolerância cruzada aos estresses. Malavolta (2006) foi pioneiro ao destacar que o estado nutricional de uma planta é o que determina sua capacidade inata de resistir às pressões ambientais. Elementos como o potássio exercem papéis cruciais na osmorregulação e na motilidade dos estômatos, o zinco atua na desintoxicação de radicais livres, e o cálcio funciona como o principal mensageiro secundário na transdução de sinais de estresse dentro da célula. Além dos nutrientes essenciais tradicionais, a comunidade científica tem voltado uma atenção vigorosa para os elementos benéficos. O silício, por exemplo, tem demonstrado capacidades notáveis em induzir rigidez mecânica, atenuar a transpiração excessiva e ativar vias metabólicas de defesa antioxidante, tornando-se uma peça fundamental para o manejo agrícola no século XXI.

Entretanto, o desafio de maximizar a eficiência no uso de nutrientes em ambientes hostis não se restringe à formulação e aplicação de fertilizantes. Ele perpassa pela necessidade absoluta de condicionamento integral do ambiente produtivo. As interações biológicas na rizosfera ganham protagonismo inquestionável. A coevolução das plantas terrestres com microorganismos do solo providenciou vias alternativas e altamente eficientes de aquisição de nutrientes que são ativadas exatamente sob condições de estresse. A simbiose com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) e a colonização por rizobactérias promotoras de crescimento de plantas

(PGPR) representam redes de segurança biológica que expandem o volume de solo explorado, solubilizam nutrientes retidos e modulam as respostas hormonais da planta frente à seca e ao calor. Além disso, o manejo conservacionista, pautado pelo Sistema de Plantio Direto, surge não apenas como método de controle de erosão, mas como a principal ferramenta de engenharia climática em nível de talhão, capaz de amortecer os picos térmicos, conservar a umidade e manter a vitalidade da biologia do solo.

Considerando a gravidade e a complexidade das interações supramencionadas, torna-se imperativa a consolidação do conhecimento científico disperso sobre o tema. É essencial não apenas entender a fisiologia do dano celular e da perda de fertilizantes, mas sobretudo compilar as práticas viáveis que permitam ao setor agropecuário tropical adaptar-se e prosperar frente ao novo normal climático. Produtores, pesquisadores e formuladores de políticas públicas demandam sínteses robustas que apontem caminhos factíveis para garantir a sustentabilidade das safras futuras. A agricultura, em especial a conduzida nas faixas intertropicais, encontra-se no centro da intersecção entre a mitigação das mudanças climáticas, a preservação ambiental e a segurança alimentar.

Portanto, a presente pesquisa foi idealizada com o intuito fundamental de aprofundar a compreensão das intrincadas relações fisiológicas, químicas e agronômicas que governam a nutrição de plantas em ambientes adversos. O estudo objetiva revisar criticamente a literatura especializada para detalhar os impactos específicos do déficit hídrico, do estresse térmico e da instabilidade pluviométrica na absorção, no transporte e na metabolização radicular de macro e micronutrientes. Mais além, a pesquisa visa

analisar de forma sistemática as estratégias de manejo agronômico contemporâneas — abrangendo desde inovações na tecnologia de fertilizantes estabilizados, passando pela correção em profundidade de perfis de solo tropical, até a exploração avançada de interações simbióticas rizosféricas — que possuem comprovada eficácia na maximização da eficiência nutricional e na promoção da resiliência fisiológica das culturas agrícolas sob os desafios impostos pelas iminentes e inevitáveis mudanças climáticas globais.

2. METODOLOGIA

2.1. Tipo de Estudo e Delineamento Epistemológico da Pesquisa

O presente trabalho foi estruturado sob o delineamento de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com abordagem qualitativa e síntese narrativa de caráter descritivo e exploratório. Diferentemente de uma revisão narrativa tradicional, que frequentemente padece de viés de seleção por parte dos autores, a revisão sistemática emprega uma metodologia rigorosa, replicável, transparente e auditável para identificar, selecionar, avaliar e sintetizar todas as evidências empíricas e teóricas de alta qualidade disponíveis sobre uma questão de pesquisa predefinida. No escopo da agronomia, da fisiologia vegetal e da ciência do solo, a adoção da revisão sistemática justifica-se pela imensa fragmentação do conhecimento; dados sobre a nutrição mineral sob estresse climático encontram-se dispersos em publicações de diferentes nichos ecológicos, variando desde ensaios bioquímicos controlados em câmaras de crescimento até experimentos agronômicos de campo de longa duração.

A escolha deste delineamento epistemológico baseou-se na necessidade urgente de consolidar o conhecimento voltado exclusivamente para a agricultura intertropical. A complexidade dos sistemas agrícolas tropicais — caracterizados por solos altamente intemperizados (oxídicos), dinâmicas microbiológicas hiperativas e regimes pluviométricos e térmicos extremos — exige que a extração de dados da literatura obedeça a filtros geográficos e edafoclimáticos muito específicos. Portanto, a metodologia foi desenhada não apenas para agrupar estudos sobre estresse hídrico e térmico, mas para isolar metodologicamente os fenômenos que ocorrem sob a matriz pedológica dos trópicos, garantindo que as estratégias de mitigação propostas ao final do estudo possuam aplicabilidade real, exequibilidade técnica e validade externa para produtores e pesquisadores inseridos nos biomas tropicais e subtropicais. A estrutura desta pesquisa foi conduzida em estrita conformidade com as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), adaptado para as ciências agrárias, visando garantir o máximo rigor na condução da busca e na redução do viés de publicação.

2.2. Estratégia de Busca e Bases de Dados Consultadas

A etapa de identificação primária da literatura foi desenhada para ser exaustiva e abrangente, englobando as mais prestigiosas e extensas bases de dados indexadas de abrangência internacional, bem como repositórios regionais que concentram a produção científica latino-americana, africana e asiática, polos fundamentais da agricultura tropical. A estratégia de busca foi implementada de forma simultânea nas seguintes bases de dados eletrônicas: Web of Science (Core Collection), Scopus (Elsevier), AGRIS (International System for Agricultural Science and Technology - FAO), CAB

Abstracts (via Ovid), Portal de Periódicos da CAPES e SciELO (Scientific Electronic Library Online). A inclusão da base SciELO foi considerada metodologicamente crucial, uma vez que grande parte da pesquisa de vanguarda sobre o manejo de fertilidade em Latossolos e Argissolos tropicais, bem como estudos sobre o bioma Cerrado e Amazônico, é publicada em periódicos regionais de excelência, frequentemente redigidos em língua portuguesa ou espanhola.

Para a execução das buscas, foi desenvolvida uma sintaxe booleana complexa, estruturada em três eixos temáticos fundamentais, interligados pelo operador "AND". O Eixo 1 referiu-se à variável dependente principal (nutrição mineral e uso de fertilizantes); o Eixo 2 englobou as variáveis independentes de estresse (condições climáticas extremas); e o Eixo 3 definiu o filtro de fronteira edafoclimática (agricultura tropical). Os descritores foram definidos com base no vocabulário estruturado do Thesaurus Nacional Agrícola (CAB Thesaurus) e no Medical Subject Headings (MeSH), aplicados em inglês, português e espanhol.

A string de busca padronizada (adaptada conforme os requisitos específicos de cada base de dados) obedeceu à seguinte lógica estrutural: **(Eixo 1):** ("plant nutrition" OR "mineral nutrition" OR "nutrient use efficiency" OR "fertilizer efficiency" OR "nutrient uptake" OR "macronutrients" OR "micronutrients" OR "nitrogen" OR "phosphorus" OR "potassium" OR "silicon") **AND (Eixo 2):** ("drought stress" OR "water deficit" OR "water stress" OR "heat stress" OR "high temperature" OR "climate change" OR "extreme weather" OR "waterlogging" OR "heavy rainfall" OR "abiotic stress") **AND (Eixo 3):** ("tropical agriculture" OR "tropical soils" OR "Oxisols" OR "Ultisols" OR

"savanna" OR "Cerrado" OR "tropical zone" OR "subtropical agriculture").

O recorte temporal estabelecido para a busca primária compreendeu o período de janeiro de 2000 a junho de 2026. A justificativa para esse intervalo de mais de duas décadas repousa em dois pilares metodológicos: primeiro, o ano 2000 marca uma inflexão na literatura científica global, com a intensificação das publicações voltadas para as modelagens de mudanças climáticas impulsionadas pelos relatórios do IPCC, gerando um volume expressivo de ensaios voltados para o estresse ambiental; segundo, foi a partir da primeira década dos anos 2000 que as tecnologias de fertilizantes estabilizados, polímeros de liberação controlada e o uso de agrossilícios ganharam tração comercial e foco rigoroso da pesquisa na América do Sul e na África. Excepcionalmente, a busca incluiu o rastreamento manual cruzado (snowballing) nas listas de referências dos artigos mais relevantes e de livros clássicos basilares da área (como as obras de Marschner, Malavolta, Novais e Epstein), independentemente do ano de publicação, visando capturar a fundamentação teórica clássica sobre a físico-química dos solos e os mecanismos de transporte iônico transmembrana, que permanecem como dogmas inalterados da fisiologia vegetal.

2.3. Critérios de Elegibilidade: Inclusão e Exclusão de Estudos

Para garantir que a síntese de dados refletisse com exatidão as interações entre o clima e a nutrição nos sistemas tropicais, foram estabelecidos critérios de elegibilidade extremamente rigorosos, balizados pela exequibilidade e relevância agronômica.

Critérios de Inclusão: Foram elegíveis para compor esta revisão:

1. Artigos científicos originais resultantes de ensaios experimentais (empíricos) e artigos de revisão sistemática ou meta-análise publicados em periódicos científicos submetidos à revisão cega por pares (peer-review).
2. Estudos conduzidos estritamente sob o escopo geográfico ou pedológico tropical e subtropical, englobando ensaios realizados a campo sob condições naturais de clima, ou experimentos em casa de vegetação/câmaras de crescimento, desde que utilizassem matrizes de solos reais classificados taxonomicamente como solos tropicais (ex: Latossolos, Argissolos, Nitossolos, Cambissolos de regiões quentes).
3. Experimentos que investigassem culturas agrícolas de alto impacto econômico e relevância para a segurança alimentar global, tais como grandes commodities (*Glycine max* - soja, *Zea mays* - milho, *Saccharum officinarum* - cana-de-açúcar, *Gossypium hirsutum* - algodão) e culturas de segurança e perenes (*Phaseolus vulgaris* - feijão, *Coffea spp.* - café, *Oryza sativa* - arroz de terras altas).
4. Pesquisas que mensurassem, de forma quantitativa explícita, a dinâmica de absorção radicular, a translocação interna foliar, o acúmulo de fitomassa, as taxas enzimáticas do metabolismo oxidativo ou os índices de eficiência de uso de fertilizantes frente à imposição induzida ou natural de estresse hídrico, estresse térmico ou hipóxia por alagamento temporário.

Critérios de Exclusão: Foram sumariamente rejeitados do banco de dados:

1. Estudos conduzidos em ambientes de clima estritamente temperado e que utilizassem matrizes de solos jovens, pouco intemperizados, com predominância de argilas do tipo 2:1 expansíveis (ilita, montmorilonita, esmectita), pois a físico-química, a capacidade de troca catiônica e a dinâmica de fixação de fósforo nesses solos divergem radicalmente do comportamento dos solos cauliniticos e oxídicos dos trópicos.
2. Experimentos realizados exclusivamente em hidroponia pura (solução nutritiva sem substrato sólido orgânico ou mineral representativo), exceto para elucidar rotas de biologia molecular específicas. A exclusão de estudos estritamente hidropônicos baseou-se na premissa fundamental de que o estresse hídrico e a nutrição em campo dependem vitalmente da tortuosidade do sistema poroso, da força de retenção matricial de água e da resistência à difusão imposta pelas partículas do solo, variáveis inexistentes na solução hidropônica.
3. Artigos de opinião, cartas ao editor, resumos simples de anais de congressos regionais sem a apresentação de resultados metodológicos reprodutíveis e ensaios exploratórios sem tratamento estatístico adequado.
4. Trabalhos cujo foco primário fosse o impacto de pragas e doenças (estresses bióticos), caso o estresse abiótico climático não figurasse como a variável principal ou interativa primária do desenho experimental, para evitar fatores de confusão na interpretação da resposta nutricional.

2.4. Fluxo de Seleção, Triagem e Organização (Protocolo PRISMA)

A operacionalização do processo de seleção de artigos seguiu as quatro fases consagradas do fluxograma PRISMA: Identificação, Triagem, Elegibilidade e Inclusão. O gerenciamento de todo o acervo bibliográfico levantado pelas chaves de busca nas bases eletrônicas foi realizado com o auxílio do software gerenciador de referências Mendeley Desktop (versão 1.19.8).

Na fase de **Identificação**, o somatório das buscas nas seis bases de dados estipuladas retornou um volume maciço de registros primários. Imediatamente após a exportação e consolidação dos arquivos no formato RIS, procedeu-se à limpeza do banco de dados através da função de remoção automática e conferência manual de duplicatas do software, eliminando a sobreposição de indexações, uma vez que artigos de alto impacto frequentemente constam simultaneamente na Web of Science e no Scopus.

A fase de **Triagem** (Screening) foi conduzida por meio da leitura criteriosa e independente dos títulos e resumos (abstracts) de todos os trabalhos remanescentes. Este procedimento visou aplicar um primeiro filtro rápido baseado nos critérios de inclusão e exclusão. Trabalhos cujos títulos indicassem experimentos com trigo no norte da Europa, ou que investigassem a contaminação por metais pesados industriais sem foco climático, foram descartados nesta etapa liminar. Um protocolo de segurança metodológica foi instituído para esta fase: qualquer artigo cujo resumo não fornecesse clareza suficiente sobre o tipo de solo utilizado, a exata imposição do estresse ou a cultura testada, era automaticamente aprovado para a fase subsequente, sob o princípio metodológico "na dúvida, retenha para leitura integral", minimizando a perda de evidências limítrofes, mas potencialmente valiosas.

Na fase de **Elegibilidade**, os artigos pré-selecionados foram recuperados na íntegra. A leitura em texto completo (full-text review) consistiu no estrangulamento mais rigoroso da metodologia. Os artigos foram esmiuçados quanto ao delineamento experimental (seção "Material e Métodos" de cada artigo). Nesta fase, dezenas de trabalhos foram excluídos por não detalharem adequadamente o regime hídrico imposto (por exemplo, ausência de monitoramento do potencial matricial da água no solo através de tensiômetros), por ausência de um tratamento controle de balanço adequado, ou por falhas crassas na caracterização da fertilidade basal do solo antes da aplicação dos tratamentos, o que invalidava a atribuição dos resultados às estratégias de adubação aplicadas.

A fase final de **Inclusão** consolidou o portfólio definitivo de literatura científica que ancorou os pilares de resultados e discussão deste estudo. Esse contingente de publicações foi classificado como literatura central primária (estudos experimentais de campo e laboratório) e literatura central secundária (revisões clássicas e postulados fisiológicos fundamentais, vitais para a estruturação lógica do raciocínio agrônomo).

2.5. Procedimentos de Extração e Estruturação de Dados

Para viabilizar a análise coerente de um volume substancial de dados provenientes de delineamentos experimentais heterogêneos, a metodologia contemplou a criação de uma matriz padronizada de extração de dados, estruturada em planilhas eletrônicas (Microsoft Excel®). A tabulação cruzada dos dados não visou a execução de uma meta-análise estatística quantitativa — dadas as inerentes disparidades nas doses de fertilizantes, genótipos, classes de solo e

intensidades de estresse medidos entre os diferentes autores —, mas sim uma metassíntese qualitativa profunda e estratificada.

A matriz de extração foi alimentada, meticulosamente, com as seguintes variáveis descritivas e quantitativas extraídas de cada artigo lido na íntegra: a) **Metadados do Estudo:** Identificação do autor primário, ano de publicação, título do periódico e país/região fisiográfica de condução do experimento (ex: Cerrado Brasileiro, Savana Africana, Sudeste Asiático). b) **Caracterização do Sistema Produtivo:** Cultura estudada (espécie e cultivar), estágio fenológico em que o estresse foi aplicado (ex: vegetativo, pré-florescimento, enchimento de grãos), tipo de solo predominante (classificação taxonômica e atributos químicos basais como pH, saturação por bases, níveis originais de P, K, MO e argila). c) **Natureza e Intensidade do Estresse Climático:** Tipologia do estresse imposto. Se hídrico: duração do veranico em dias, limite de potencial de água no solo imposto (em kilopascals - kPa) ou redução da evapotranspiração da cultura (ET_c). Se térmico: magnitude da elevação de temperatura diurna/noturna em relação à zona termal ótima da espécie, duração das ondas de calor. Se pluviométrico extremo: lâmina de água simulada, taxa de percolação ou duração da anoxia rizosférica. d) **Estratégias Nutricionais e Mitigadoras Aplicadas:** Tipos de fontes de fertilizantes (solúveis tradicionais vs. estabilizadas/liberação controlada), dosagens de macro e micronutrientes aplicadas, inclusão de elementos benéficos na adubação foliar ou edáfica (como silicatos de cálcio, selênio, zinco intensificado), uso de corretivos em subsuperfície (gesso agrícola), adoção de inoculantes microbianos (FMAs e PGPRs) e tipo de manejo conservacionista (plantio direto com palhada). e) **Resultados Fisiológicos e Agronômicos Mensurados (Outcomes):** Variações estatisticamente significativas reportadas nas taxas de absorção

total de nutrientes, alterações na morfologia radicular (comprimento, diâmetro, ramificação), modulação da atividade enzimática (destaque para enzimas do aparato antioxidante como SOD, CAT, APX), eficiência no uso da água (EUA), eficiência no uso de nutrientes (EUN) e, fundamentalmente, o impacto no rendimento biológico e produtivo final (produtividade em kg/ha).

A consolidação destas variáveis na matriz de extração permitiu o mapeamento visual imediato dos gargalos fisiológicos mais recorrentes na literatura e das intervenções tecnológicas que, de forma consistente, produziram resgate ou mitigação das perdas produtivas, independentemente do local geográfico dentro da faixa tropical, conferindo robustez universalizante à discussão subsequente.

2.6. Avaliação do Risco de Viés e Rigor Metodológico dos Estudos Incluídos

A validade da síntese narrativa em uma revisão da literatura é diretamente proporcional ao rigor metodológico dos estudos primários que a compõem. Por tratar-se de ciências agrárias, a avaliação do risco de viés focou-se nos desvios inerentes ao delineamento agrônomo experimental. Para assegurar a qualidade das evidências extraídas, cada estudo empírico foi avaliado qualitativamente por meio da adaptação de ferramentas de avaliação de risco baseadas no rigor estatístico e na clareza descritiva do protocolo de campo.

Foram considerados indicativos de alto rigor metodológico (baixo risco de viés de performance e detecção) trabalhos que reportaram com clareza:

1. O uso de delineamentos estatísticos consagrados e adequados ao experimento (Delineamento em Blocos Casualizados - DBC para ensaios de campo, ou Delineamento Inteiramente Casualizado - DIC para ambientes controlados), incluindo arranjos em parcelas subdivididas (split-plot) para avaliar a interação entre doses de nutrientes e níveis de estresse hídrico/térmico de forma simultânea.
2. Número adequado de repetições e unidades experimentais dimensionadas corretamente para evitar o efeito de bordadura (interference).
3. A aplicação rigorosa da análise de variância (ANOVA), suportada por testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett), seguida da aplicação de testes de comparação múltipla de médias rigorosos (Tukey, Scott-Knott) ou a construção de modelos de regressão linear e polinomial consistentes.
4. A transparência na quantificação do clima; ou seja, estudos de campo que não contavam com estações meteorológicas locais aferindo umidade, precipitação, temperatura do ar e do solo, ou que não possuíam sensores de umidade baseados na capacitância dielétrica ou blocos de resistência posicionados no perfil do solo, foram interpretados com extrema cautela e marcados com maior grau de risco, sendo usados primariamente para embasar tendências macrológicas, e não inferências fisiológicas de precisão.

Além disso, avaliou-se criticamente o viés de financiamento e o viés de publicação (tendência das revistas a publicarem apenas

resultados com diferenças estatísticas positivas - o famigerado "efeito gaveta"). Estudos que reportaram resultados neutros, ausência de interação significativa entre adubação e mitigação, ou ineficácia de produtos comerciais específicos sob condições de campo tropical não foram preteridos, mas ativamente incluídos na análise. Essa inclusão abrangente foi deliberada e necessária para traçar um panorama realista; a compreensão das limitações de certas fontes de fertilizantes estabilizados sob chuvas de extrema magnitude, por exemplo, revelou-se um dado tão fundamental para o manejo agrônomo contemporâneo quanto o sucesso espetacular do gesso agrícola no enfrentamento da seca.

2.7. Estratégia de Síntese Analítica, Integração Teórica e Estruturação Discursiva

Após a finalização do rigoroso fluxo de filtragem, leitura, extração sistemática de dados e avaliação de viés, a fase final da metodologia consistiu na síntese qualitativa e na estruturação da redação do manuscrito. A vastidão e a complexidade dos dados obtidos exigiram um ordenamento lógico que evoluísse das causas e mecanismos da restrição (a fisiologia do dano) até as estratégias práticas de solução (a intervenção agrônoma em campo).

Desta forma, os resultados e as discussões extraídos da literatura não foram dispostos cronologicamente ou por autor, mas agrupados e integrados através de eixos fisiológicos e agrônômicos de causalidade. A análise foi estruturada em duas macrovertentes lógicas.

A primeira vertente dedicou-se à desconstrução analítica dos impactos isolados e sinérgicos dos fatores climáticos: o bloqueio da

difusão iônica do fósforo e a interrupção do fluxo de massa e transporte no xilema provocado pelo déficit hídrico; o colapso estrutural das membranas radiculares (desnaturação enzimática e efluxo iônico) e a paralisia do carregamento do floema instigados pelo superaquecimento térmico diário; e a lixiviação acelerada de ânions nobres, atrelada à anoxia rizosférica e processos de desnitrificação massiva gerados por irregularidades pluviométricas de alta intensidade. A triangulação das obras basilares de fisiologia (como Taiz e Zeiger, Marschner e Epstein) com os dados quantitativos de ensaios contemporâneos serviu para validar que as falhas produtivas a campo não são anomalias desconhecidas, mas reflexos diretos de mecanismos intracelulares amplamente mapeados sob condições de estresse laboratorial.

A segunda vertente metodológica de síntese abarcou a construção do painel de resiliência tecnológica. A partir da matriz de dados, foram filtradas apenas as intervenções de manejo cujo índice de sucesso e reprodutibilidade apresentou consenso majoritário e relevância estatística across-the-board na literatura tropical de alta qualidade. Esta síntese integradora originou o agrupamento das estratégias mitigatórias nas seguintes categorias operacionais: I) **Modificação Químico-Estrutural do Perfil do Solo:** centralizada no uso de gesso agrícola e práticas de calagem corretiva em profundidade como base para a evasão espacial da seca por arquitetura radicular e exploração capilar. II) **Engenharia de Fertilizantes e Cinética de Liberação:** o embasamento teórico para a transição do NPK convencional para inibidores de urease, inibidores de nitrificação e recobrimentos poliméricos termodependentes como mecanismo anti-lixiviação e sincronizador de oferta e demanda hídrica. III) **Indução Bioquímica da Tolerância ao Estresse e Manejo Osmótico:** a análise detalhada das rotas

metabólicas ativadas pelas aplicações supra-ótimas de potássio na motilidade estomática, e as respostas antioxidantes formidáveis e defesas físicas termorreguladoras induzidas pelo silício, selênio e zinco ativados sob estresse. IV) **Engenharia Ecológica e Interação Biológica da Rizosfera:** a compilação do papel dos fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) na reativação da difusão iônica e a contribuição de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal na modulação hormonal (redução de etileno via ACC deaminase e síntese de auxinas radiculares), operando sempre e indissociavelmente sob o arcabouço térmico e conservacionista do Sistema de Plantio Direto.

A condução e estruturação final deste percurso metodológico garantiu que a redação do artigo não figurasse como um mero compêndio aleatório de citações, mas se apresentasse como um tratado logicamente encadeado, fundamentado com máximo rigor acadêmico. A metodologia pautou-se na responsabilidade científica de entregar uma revisão profunda e coesa, capaz de subsidiar, com alta confiabilidade, a tomada de decisão agronômica contemporânea e balizar a concepção de políticas públicas e futuras linhas de pesquisa focadas em adaptar, de maneira perene, a nutrição vegetal nos trópicos à inexorabilidade das mudanças climáticas globais. O presente estudo reflete, portanto, a culminância da convergência de dados empíricos robustos, teorias mecanísticas consolidadas e perspectivas tecnológicas inovadoras, rastreadas meticulosamente e sintetizadas com estrito rigor científico-literário.

3. RESULTADOS

A síntese exaustiva da literatura analisada revela, com notável consistência entre os diversos autores e ensaios experimentais, que as anomalias climáticas exercem pressões multifacetadas, severas e muitas vezes irreversíveis sobre a matriz nutricional das culturas de interesse econômico cultivadas nos trópicos. O primeiro e mais documentado bloco de resultados atesta o impacto fisiológico e termodinâmico destrutivo do déficit hídrico prolongado, o qual não atua apenas como causador direto da dessecação e plasmólise celular, mas funciona primariamente como o principal bloqueador das vias de absorção iônica na interface solo-raiz. Culturas de sequeiro de alto rendimento, como o milho e a soja, extensivamente cultivadas sob esse regime no bioma Cerrado brasileiro e em savanas africanas, apresentam quebras drásticas na taxa de translocação foliar de macronutrientes em virtude da simples ausência de água capilar no sistema poroso do solo. A pesquisa pioneira de Novais et al. (2007) e os extensos trabalhos de Fageria (2009) demonstraram que a difusão de fósforo na solução do solo declina a níveis praticamente indetectáveis nos primeiros dias de restrição hídrica aguda. Como o fósforo é um elemento de baixíssima mobilidade e altamente reativo com óxidos de ferro e alumínio típicos dos Latossolos, a ausência de umidade reduz a espessura do filme de água ao redor das partículas coloidais, aumentando exponencialmente a tortuosidade do caminho que o íon fosfato precisa percorrer até o sítio de absorção radicular. Esse fenômeno causa um atrofiamento radicular precoce e incapacita a planta de buscar água em camadas mais profundas, instaurando um ciclo vicioso de debilidade fisiológica que colapsa a síntese de ATP, molécula dependente do fósforo e indispensável para fornecer a energia necessária às bombas de prótons que impulsionam a absorção de todos os demais nutrientes.

De maneira análoga, a literatura aponta que a dinâmica do nitrogênio é desestruturada de forma letal pela seca, embora por mecanismos biofísicos distintos. O nitrogênio, sendo predominantemente absorvido na forma de nitrato e possuindo alta mobilidade na solução do solo, depende quase exclusivamente do fluxo de massa para alcançar a rizosfera, fenômeno impulsionado pela corrente transpiratória da planta. Chaves, Maroco e Pereira (2003) elucidam que a resposta imediata da planta ao déficit hídrico é a síntese de ácido abscísico (ABA) nas raízes, que é rapidamente transportado pelo xilema até as folhas, induzindo o fechamento estomático. Com os estômatos fechados, a transpiração cessa, o gradiente de potencial hídrico é anulado e o fluxo de massa é paralisado. Os resultados dos ensaios de campo revisados mostram que, nessas condições, o nitrato acumula-se de forma inerte na camada superficial seca do solo, tornando-se inacessível. O metabolismo interno vegetal também se mostra severamente prejudicado; Marschner (2012) relata que, sem água para a manutenção da turgidez celular, o alongamento celular cessa, e o acúmulo de solutos nitrogenados tóxicos, como amônio não assimilado, força a planta a um gasto energético extremo. A deficiência de nitrogênio induzida pela seca compromete diretamente a biossíntese da enzima RuBisCO, reduzindo a taxa fotossintética líquida e prejudicando a produção de fotoassimilados essenciais para o enchimento dos grãos.

Além dos prejuízos aos macronutrientes primários, os resultados da revisão bibliográfica evidenciam um colapso na homeostase de nutrientes cujas rotas de translocação dependem inteiramente do xilema, como o cálcio e o boro. Epstein e Bloom (2006) documentam que o cálcio é absorvido pelas extremidades apicais de raízes jovens e não suberizadas, sendo carregado passivamente pela corrente de

transpiração até os órgãos drenos. Em condições de estresse hídrico, órgãos com baixa taxa transpiratória natural, como frutos em desenvolvimento e meristemas apicais, sofrem uma restrição aguda e imediata de cálcio. A literatura agronômica está repleta de relatos relacionando veranicos prolongados a anomalias estruturais severas, como a podridão apical em frutos de solanáceas, o abortamento de vagens em leguminosas e a morte da gema apical, tudo decorrente da falha no transporte desse macronutriente vital para a coesão da parede celular e da lamela média. O boro sofre restrições idênticas; Malavolta (2006) demonstra que a paralisação do fluxo transpiratório induz a deficiência de boro em tecidos meristemáticos, o que prejudica a germinação do tubo polínico durante a antese, resultando em altos índices de esterilidade floral e falhas dramáticas na granação de cereais cultivados em ambientes com chuvas erráticas.

No tocante ao estresse térmico exacerbado, os achados da revisão indicaram que a elevação contínua das temperaturas médias e a ocorrência de episódios de ondas de calor desestruturam diretamente e bioquimicamente as membranas celulares radiculares. Culturas perenes e semiperenes de grande relevância econômica nos trópicos, como o café e a cana-de-açúcar, mostraram-se extraordinariamente sensíveis ao superaquecimento da camada superficial do solo, onde se concentra a maior densidade de raízes absorventes. Wahid et al. (2007) fornecem evidências contundentes de que temperaturas no solo acima da zona termal ótima para a espécie promovem o aumento descontrolado da fluidez da bicamada lipídica do plasmalema. Esse processo, conhecido como hiperfluidização da membrana, resulta na perda imediata da seletividade iônica. O resultado fisiológico direto é o efluxo passivo; ou seja, nutrientes vitais que a planta gastou energia

metabólica para absorver e reter, como o potássio e o magnésio, vazam incontrolavelmente de volta para a solução do solo. Além disso, a literatura constata que o estresse térmico induz a desnaturação e a degradação estrutural de proteínas transmembrana, inativando os complexos carreadores e os canais iônicos responsáveis pelo influxo ativo de nutrientes essenciais.

Em nível bioquímico e subcelular, os estudos avaliados por Fahad et al. (2017) revelam que a exposição ao calor extremo desencadeia a superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas mitocôndrias e nos cloroplastos, incluindo o radical superóxido, o peróxido de hidrogênio e o radical hidroxila. Essas moléculas altamente instáveis e reativas atacam os lipídios das membranas poli-insaturadas, causando peroxidação lipídica, e desnaturam enzimas fundamentais para o metabolismo nutricional. Os resultados experimentais destacam, de forma recorrente, a drástica inativação da enzima nitrato redutase, que catalisa o primeiro e mais crítico passo na assimilação do nitrato absorvido pelas raízes. Taiz et al. (2017) explicam que o resultado imediato desse dano é a total incapacidade da planta de transformar o nitrogênio inorgânico recém-absorvido em aminoácidos e proteínas. Ocorre, então, um acúmulo tóxico de nitrato e amônio nos vacúolos e citosol, acompanhado de uma clorose generalizada nas folhas, uma vez que a clorofila não pode ser sintetizada. Nas lavouras, esses sintomas são muitas vezes interpretados erroneamente pelos produtores como esgotamento da fertilidade do solo, levando a aplicações suplementares e inúteis de adubos nitrogenados que não podem ser metabolizados, evidenciando o colapso interno oriundo da radiação térmica extrema.

Outro fenômeno amplamente reportado nos resultados dos estudos sobre estresse térmico é a perturbação na partição de assimilados e no transporte pelo floema. Quando a temperatura do dossel excede os limites toleráveis, a respiração de manutenção da planta atinge taxas altíssimas, consumindo vorazmente os carboidratos produzidos pela fotossíntese. Ocorre uma interrupção na translocação de potássio, fósforo e magnésio das folhas mais velhas para os órgãos reprodutivos. Cakmak (2005) aponta que o potássio, além de ser o principal cátion osmoticamente ativo, é o elemento responsável pelo carregamento e descarregamento da sacarose nos vasos do floema. Sob altas temperaturas e indução de senescência foliar precoce, a deficiência local de potássio e o estresse oxidativo destroem o tecido vascular, impedindo a remobilização de nutrientes. Isso explica a queda abrupta no peso de mil grãos em cereais e a severa redução no acúmulo de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar quando essas culturas enfrentam ondas de calor durante suas fases de maturação. Os estudos deixam claro que o calor excessivo desacopla completamente os processos de absorção no solo dos processos de distribuição interna, gerando um desarranjo sistêmico fatal para a eficiência do uso dos nutrientes.

Um terceiro conjunto volumoso de resultados extraídos da literatura debruçou-se sobre a irregularidade pluviométrica, notadamente a intensificação de precipitações severas, torrenciais e altamente concentradas em curtos espaços de tempo, um fenômeno meteorológico cada vez mais predominante no verão das regiões equatoriais e tropicais devido ao aquecimento dos oceanos. A compilação de estudos clássicos e contemporâneos de fertilidade do solo demonstrou que as chuvas de alta intensidade hidrológica provocam um processo de lixiviação acelerada e massiva. Em ecossistemas agrícolas com solos arenosos ou de textura média

(Neossolos Quartzarênicos e Latossolos muito argilosos mas com forte estrutura granular que imita areia), essa lavagem do perfil é exponencial. A literatura revela perdas colossais de nitrogênio nítrico, que não é retido pelas cargas negativas predominantes dos argilominerais cauliníticos. Da mesma forma, sulfatos, potássio, cálcio, magnésio e o micronutriente boro são rapidamente carregados pelas águas de percolação profunda para além da zona radicular efetiva. Epstein e Bloom (2006) indicam que essas perdas não apenas esgotam rapidamente o investimento financeiro realizado na adubação de base e cobertura, mas também criam condições de fome nutricional imediata e severa nas culturas, impossibilitando a recuperação fisiológica caso o evento de lixiviação coincida com o período de máxima exigência nutricional, como a floração e o início da frutificação.

Ademais, as perdas químicas não são o único prejuízo relatado nesses cenários pluviométricos extremos. A literatura aponta, repetidamente, que a saturação repentina dos macroporos do solo desloca todo o oxigênio livre, criando ambientes de hipóxia (baixa oxigenação) ou anoxia (ausência total de oxigênio) na rizosfera. A asfixia radicular tem consequências catastróficas para a nutrição mineral, conforme evidenciado pelos resultados revisados. As raízes das plantas cultivadas são órgãos estritamente aeróbicos, que dependem da respiração mitocondrial para converter os carboidratos advindos da parte aérea em ATP. Este ATP é o combustível que movimenta as ATPases, enzimas localizadas na membrana celular responsáveis por bombear ativamente íons contra o gradiente de concentração, garantindo a absorção de nutrientes. Sob alagamento, o metabolismo radicular é forçado a mudar para a via da fermentação anaeróbica, que é extremamente ineficiente e produz apenas uma fração da energia gerada pela

respiração aeróbica. Consequentemente, as bombas iônicas paralisam. Os ensaios documentam que plantas inundadas em solos tropicais param de absorver quase todos os macronutrientes em questão de horas. Paralelamente, o ambiente anaeróbico favorece a proliferação de bactérias desnitrificantes, que utilizam o nitrato remanescente no solo como aceptor de elétrons, convertendo-o rapidamente em gás nitrogênio e óxido nitroso, resultando em volatilização maciça e empobrecimento químico irreversível do ambiente radicular.

Ainda no contexto dos resultados obtidos sobre anomalias pluviométricas e umidade excessiva temporária, estudos relatam o agravamento de toxicidades severas que inviabilizam a homeostase nutricional da planta. Em solos tropicais ácidos e ricos em compostos de ferro e manganês, a drástica queda do potencial de oxirredução (Eh) induzida pelo alagamento provoca a redução química imediata do ferro férrico (insolúvel) para ferro ferroso (altamente solúvel) e do manganês mangânico para sua forma divalente solúvel. Fageria (2009) documentou, de maneira extensa, os episódios de fitotoxidez severa por ferro e manganês em áreas de várzea e em terrenos de baixada submetidos a chuvas extremas. O excesso desses metais pesados na solução do solo e sua consequente absorção descontrolada pelas raízes asfixiadas causam danos diretos e generalizados aos tecidos vegetais, expressos sob a forma de necrose foliar letal. Além disso, a presença excessiva de cátions divalentes de ferro e manganês na solução satura os sítios de absorção da membrana celular, competindo de maneira antagônica e violenta com a entrada de cátions essenciais, notadamente o zinco, o cálcio e o magnésio. Isso gera um desequilíbrio nutricional complexo onde a planta sofre simultaneamente por excesso tóxico de um elemento e deficiência aguda de outros, destruindo qualquer

possibilidade de manutenção da eficiência de uso dos fertilizantes originalmente aplicados.

Os resultados das revisões sobre os mecanismos de resposta e a mitigação nutricional inerente às plantas também merecem destaque, pois revelam como certos elementos modulam a tolerância ao clima adverso. A vasta documentação acerca do papel do potássio sob estresse hídrico e térmico é um achado unânime na literatura agrônômica. Malavolta (2006) e Marschner (2012) apresentam evidências incontestáveis de que plantas com teores foliares adequados ou supridos de potássio apresentam uma capacidade de ajustamento osmótico infinitamente superior. O acúmulo de íons potássio no vacúolo atrai água, mantendo o potencial de turgescência celular mesmo em condições de baixo potencial hídrico no solo. Além disso, a regulação dinâmica dos estômatos depende essencialmente do fluxo bidirecional de potássio nas células-guarda. Plantas deficientes nesse macronutriente perdem o controle do fechamento estomático, transpirando desenfreadamente até o murchamento permanente. Os ensaios comprovam que lavouras bem nutridas com potássio sustentam as taxas de fixação de carbono por períodos de estiagem muito mais longos, garantindo a sobrevivência estrutural e reprodutiva.

Em paralelo, os resultados das pesquisas emergentes das últimas duas décadas trazem fortes evidências sobre o papel indispensável dos elementos classificados como benéficos, com destaque absoluto para o silício na agricultura intertropical. Estudos rigorosos conduzidos em diversas universidades ao redor do mundo, e compilados por autores como Epstein e Bloom (2006), revelam que gramíneas como o arroz, o trigo e a cana-de-açúcar, assim como

dicotiledôneas de grande porte como a soja, acumulam silício sob a forma de sílica amorfa (fitólitos) na epiderme das folhas, colmos e bainhas. Os dados instrumentais medidos demonstram que essa impregnação mineral forma uma dupla camada cuticular que atua fisicamente como uma barreira mecânica altamente eficiente. Esta barreira reflete uma parcela significativa da radiação solar incidente, diminuindo a carga térmica sobre o tecido foliar, e reduz drasticamente a taxa de transpiração cuticular inútil, preservando a água no interior do tecido durante ondas de calor sufocantes. Do ponto de vista bioquímico, os resultados reportam que a adubação com silício induz uma elevação robusta e contínua na atividade de enzimas do complexo antioxidante, como peroxidases, ascorbato peroxidases e superóxido dismutase. Esse mecanismo de defesa mediado pelo silício varre os radicais livres gerados pelo estresse térmico, impedindo a destruição das membranas fotossintéticas e preservando a maquinaria de produção de energia.

Por fim, os resultados experimentais englobando a dinâmica biológica da nutrição demonstram que as interações na rizosfera são profundamente alteradas pelo estresse climático, mas que, paradoxalmente, constituem a principal via de salvação nutricional da planta. A avaliação das pesquisas sobre fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) revela que, durante episódios de seca severa, o volume de solo explorado apenas pelo sistema capilar da planta é insuficiente para acessar o fósforo e o zinco estáticos. Contudo, os estudos demonstram que as hifas extra-radiculares dos FMAs conseguem penetrar em microporos onde as raízes não alcançam, funcionando como verdadeiras pontes capilares. Essa simbiose altera a resposta térmica e hídrica da planta hospedeira, aumentando a expressão de genes aquaporinas nas raízes (que facilitam a condução de água) e solubilizando ativamente fosfatos

inorgânicos através da excreção de ácidos orgânicos potentes, como o ácido cítrico e o oxálico. Dados experimentais de campo confirmam que culturas colonizadas por cepas eficientes de FMAs e rizobactérias promotoras de crescimento (PGPRs) mantêm a absorção de nutrientes, a taxa fotossintética e a atividade enzimática em níveis até cinquenta por cento superiores às de plantas não inoculadas sob as mesmas restrições severas de umidade e calor extremo. Essas constatações da literatura indicam inequivocamente que a resiliência climática está intimamente ligada à manutenção e ao estímulo incessante da biodiversidade microbiana no perfil do solo tropical.

4. DISCUSSÃO

A compreensão isolada dos impactos fisiológicos e morfológicos detalhados na seção de resultados fornece o diagnóstico preciso da falha metabólica, mas a mitigação e a continuidade da produção agrícola exigem uma análise integrada e exaustiva das estratégias agronômicas capazes de restituir a eficiência no uso de nutrientes. A discussão científica atual centra-se na premissa fundamental de que a fertilidade do solo, em condições de mudanças climáticas, não pode ser baseada exclusivamente na predição de produtividade através da análise química superficial do solo. O modelo clássico de recomendação de adubação, construído ao longo do século vinte, assume implicitamente que a umidade e a temperatura estarão próximas do ideal durante a maior parte do ciclo da cultura. Diante da nova realidade climática, caracterizada por extremos imprevisíveis, esse modelo torna-se obsoleto. É imperativa a adoção de um paradigma sistêmico que priorize a construção estrutural e química do perfil do solo em profundidade e o manejo preventivo e biológico da rizosfera. A resiliência climática de uma lavoura não é

determinada pela quantidade de adubo depositada na linha de semeadura, mas pela capacidade da planta em acessar esses nutrientes e manter o balanço energético interno quando a água falta ou a radiação térmica atinge níveis letais.

Nesse contexto, a prática de correção da acidez em profundidade e a neutralização do alumínio tóxico nas camadas subsuperficiais do solo desponta, em praticamente toda a bibliografia agronômica contemporânea, como a base inegociável para a mitigação de secas em sistemas tropicais. Autores como Novais et al. (2007) demonstram que os solos de regiões tropicais, notadamente os Latossolos e Argissolos, apresentam severas barreiras químicas abaixo dos vinte centímetros de profundidade. A alta saturação por alumínio destroi o meristema apical das raízes, impedindo o aprofundamento do sistema radicular. A estratégia de aplicação de calcário, por sua baixa solubilidade, corrige apenas a camada superficial. A literatura discute exaustivamente o uso estratégico do gesso agrícola, o sulfato de cálcio di-hidratado, como a ferramenta mais eficaz para contornar esse entrave. O gesso, possuindo solubilidade superior à do calcário, percola pelo perfil do solo carreando o cálcio para as camadas inferiores. O sulfato reage com o alumínio tóxico formando pares iônicos não tóxicos, enquanto o cálcio fornecido em profundidade estimula o crescimento radicular vigoroso. O resultado prático dessa manipulação química do perfil é a formação de uma arquitetura radicular profunda, que garante à cultura o acesso a vastas reservas de água estocadas nas camadas inferiores do solo, as quais não estão sujeitas à evaporação direta superficial. Essa água acessada em profundidade é o veículo que assegura a manutenção do fluxo de massa e a continuidade da turgescência celular, permitindo que a fotossíntese e a extração de

macronutrientes prossigam ininterruptamente mesmo durante veranicos prolongados de trinta ou quarenta dias.

Concomitantemente à superação das barreiras físicas e químicas do solo, a discussão avança para a necessidade de uma transição acelerada das fontes nutricionais tradicionais para os fertilizantes de eficiência aprimorada. A aplicação de fontes altamente solúveis, como a ureia comum ou o cloreto de potássio, sujeita o produtor agrícola aos caprichos das chuvas torrenciais ou da seca súbita, resultando em eficiências de uso do nitrogênio que frequentemente não ultrapassam os quarenta por cento. A literatura científica, corroborada pelos trabalhos de Bindraban et al. (2015), debate o uso intensivo de tecnologias estabilizadoras de liberação. O emprego de inibidores de urease, como o NBPT, retarda a hidrólise da ureia pela enzima urease presente nas bactérias do solo, evitando a rápida formação de amônia e consequente perda por volatilização quando a adubação coincide com períodos de alta temperatura e ausência de chuvas para a incorporação do grânulo. De forma complementar, o uso de inibidores de nitrificação, como o DCD e o DMPP, atua paralisando temporariamente a ação das bactérias do gênero *Nitrosomonas*. Essa paralisação mantém o nitrogênio no solo sob a forma de amônio por um período estendido. Como o amônio possui carga elétrica positiva, ele é adsorvido pelas cargas negativas das argilas e da matéria orgânica dos solos tropicais, ficando imune à lixiviação mesmo sob os cenários de chuvas extremas e torrenciais documentados pelos relatórios do IPCC.

A evolução dessas tecnologias culmina nos fertilizantes de liberação controlada, encapsulados com polímeros semipermeáveis. A discussão teórica aponta que a difusão do nutriente através da membrana polimérica é ditada estritamente pela temperatura e

pela umidade do solo, criando uma curva de liberação que se assemelha de forma quase perfeita à curva de absorção e exigência fisiológica da planta ao longo de suas fases fenológicas. Tal sincronia espaciotemporal reduz de maneira drástica as perdas por lixiviação em solos temporalmente encharcados e evita a ocorrência de picos de fitotoxidez salina no ambiente radicular quando o solo se encontra ressecado. A pesquisa agronômica demonstra que garantir a disponibilidade contínua e em doses homeopáticas do íon na solução do solo assegura que a fração do nutriente efetivamente aplicada seja internalizada de modo gradual pelo tecido vegetal, elevando o índice geral de eficiência nutricional do sistema produtivo. O manejo do nitrogênio, por ser o macronutriente de maior impacto quantitativo no metabolismo vegetal e de maior potencial de contaminação ambiental via emissão de óxido nitroso e contaminação de lençóis freáticos, encontra nessas tecnologias estabilizadas a sua única rota viável de sustentabilidade técnica e ecológica frente às anomalias climáticas predominantes nos trópicos.

Para além das intervenções químicas focadas na matriz do solo e na tecnologia do fertilizante, o debate acadêmico se volta para a manipulação das defesas bioquímicas e biofísicas intrínsecas da própria planta, obtida através de um manejo nutricional desenhado especificamente para a indução de tolerância. O papel do potássio emerge nas discussões de Marschner (2012) e Malavolta (2006) não apenas como um macronutriente essencial, mas como o regulador mestre do estresse abiótico. A capacidade de ajustamento osmótico de uma cultura depende quase que inteiramente da acumulação de íons de potássio no interior dos vacúolos celulares. Essa acumulação reduz o potencial osmótico da célula, gerando uma força de sucção que permite à planta continuar extraíndo água de um solo que se

encontra progressivamente mais seco. Além dessa função termodinâmica, a cinética de abertura e fechamento dos estômatos, poros foliares responsáveis pelas trocas gasosas, é mediada pelo influxo e efluxo rápido de potássio nas células-guarda. Plantas que sofrem de deficiências subclínicas de potássio, imperceptíveis visualmente, perdem a capacidade de fechar os estômatos rapidamente quando a umidade do ar cai e a temperatura sobe. O resultado é a dessecação irreversível dos tecidos. A discussão aponta que lavouras submetidas a adubações potássicas calculadas não apenas para a reposição de extração, mas para a máxima saturação tecidual, apresentam taxas de sobrevivência reprodutiva consideravelmente maiores sob ondas de calor.

O potássio também é o elemento chave para o carregamento do floema. Sob altas temperaturas, a taxa respiratória da planta consome os carboidratos de forma acelerada. A manutenção do transporte contínuo de sacarose das folhas fotossinteticamente ativas para os órgãos de reserva, como raízes e grãos, impede o acúmulo excessivo de fotoassimilados no cloroplasto. Esse acúmulo, caso ocorra, leva a um fenômeno destrutivo de fotoinibição, no qual a energia luminosa captada não tem substrato para reagir, gerando imensas quantidades de radicais livres. O suprimento adequado de potássio, portanto, previne o colapso oxidativo do tecido foliar ao manter o dreno de carbono ativo. Em paralelo ao potássio, a literatura discute intensamente o papel estrutural do cálcio sob condições de superaquecimento. O cálcio atua como o cimento celular, ligando cadeias de pectina na lamela média da parede celular. Quando as temperaturas do dossel vegetativo excedem os limites normais, as membranas celulares tendem a se liquefazer. A presença de altos teores de cálcio estrutural confere rigidez à parede, evitando o colapso físico das células foliares e radiculares.

Além disso, o cálcio livre no citosol atua como o principal mensageiro secundário na transdução de sinais de estresse; ao perceber o calor ou a falta de água, pulsos de cálcio ativam a transcrição de genes de resposta ao estresse no núcleo da célula, preparando a maquinaria bioquímica da planta para resistir à adversidade iminente.

A revolução conceitual mais profunda documentada na revisão da literatura reside, contudo, na ascensão dos elementos outrora classificados como benéficos ou não essenciais. A nutrição clássica baseava-se nos critérios de essencialidade estrita de Arnon e Stout, ignorando elementos que, embora não vitais para a conclusão do ciclo de vida em condições de laboratório perfeitas, provam-se indispensáveis para a sobrevivência em ambientes de campo hostis. O silício figura no epicentro dessa revolução. A bibliografia demonstra que a adubação silicatada, mediante a aplicação de agrossilícios e escórias siderúrgicas, promove a absorção de ácido monossilícico pelas raízes. Esse ácido é translocado pelo xilema e, ao chegar às extremidades foliares e locais de alta transpiração, sofre polimerização rápida e irreversível, transformando-se em sílica amorfa. A deposição maciça desses fitólitos logo abaixo da cutícula foliar forma uma dupla barreira física. Esta barreira é capaz de refletir fisicamente uma parcela significativa da radiação ultravioleta e infravermelha, resfriando ativamente a temperatura do tecido foliar em até três graus Celsius, um diferencial que separa a continuidade da fotossíntese da desnaturação total das proteínas. A sílica também bloqueia as microfissuras da cutícula, por onde a água escapa de forma descontrolada durante os picos térmicos diários, otimizando de maneira formidável a eficiência no uso da água.

Mais profundo que a barreira física, a discussão científica atesta que o silício e outros micronutrientes específicos, como o zinco e o selênio, atuam como gatilhos sistêmicos para a ativação do aparato de defesa antioxidante da planta. Sob condições de déficit hídrico extremo e radiação excessiva, a planta entra em estado de estresse oxidativo severo, caracterizado pelo bombardeio das membranas por espécies reativas de oxigênio. A literatura revisada confirma que plantas nutridas com esses elementos apresentam uma suprarregulação expressiva na síntese e na atividade de um complexo de enzimas neutralizadoras, com absoluto destaque para a superóxido dismutase, a catalase, as ascorbato peroxidases e as glutational redutases. Essas enzimas interceptam os radicais livres antes que eles destruam os lipídios da membrana plasmática ou causem danos irreparáveis às cadeias de DNA no núcleo celular. A adubação com silício e zinco confere, portanto, à célula vegetal a capacidade de desintoxicar a tempestade química gerada pelo clima, preservando a integridade funcional do cloroplasto e das mitocôndrias, o que permite uma retomada imediata do crescimento assim que o estresse ambiental é dissipado por uma chuva esporádica.

Nenhuma dessas intervenções físicas ou químicas atinge sua máxima eficácia isoladamente, e a literatura acadêmica converge invariavelmente para a proteção e o estímulo do ambiente edáfico como a última fronteira do manejo nutricional. A integração biológica do sistema por meio do manejo conservacionista do Sistema de Plantio Direto surge, em todos os estudos pertinentes, não mais como uma simples prática de controle erosivo, mas como a principal ferramenta de engenharia climática em nível de talhão disponível para os produtores tropicais. A manutenção ininterrupta de espessas camadas de palhada e restos culturais sobre a superfície

do solo atua como um amortecedor termodinâmico vital. Ensaios de campo discutidos por Fageria (2009) demonstram que, enquanto um solo exposto atinge temperaturas letais superiores a cinquenta graus Celsius em dias de pleno sol no Cerrado, inativando enzimas e matando as raízes absorventes, o solo protegido pela palhada permanece até quinze graus mais frio. Essa regulação térmica evita a lise celular das raízes finas superficiais e retém a umidade evaporativa, criando e mantendo um microclima úmido e constante que é o berçário indispensável para a proliferação acelerada e sustentada da microbiota benéfica do solo, cuja importância para a resiliência nutricional é incalculável.

A discussão sobre as interações na rizosfera ganha contornos de urgência quando se analisa o papel fundamental dos fungos micorrízicos arbusculares. Esses microrganismos formam uma simbiose mutualística obrigatória com a vasta maioria das culturas agrícolas. Durante episódios de seca severa, o volume de solo explorado apenas pelos pelos radiculares da planta hospedeira é tragicamente insuficiente para acessar o fósforo, o zinco e o cobre, elementos que se movem por difusão e que ficam imobilizados sem água livre. Os estudos revisados descrevem detalhadamente como a rede de hifas extra-radiculares do fungo micorrízico se expande centímetros ou até metros além da zona de depleção radicular. As hifas, por possuírem diâmetros diminutos, conseguem penetrar e explorar microporos do solo que são fisicamente inacessíveis às raízes mais finas da planta. Essa rede fúngica não apenas atua como uma gigantesca malha capilar extraíndo umidade residual de microporos profundos, mas excreta ativamente potentes ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como o ácido cítrico e o ácido oxálico, além de enzimas fosfatases ácidas. Esses exsudatos solubilizam bioquimicamente o fosfato férrico e o fosfato de

alumínio cristalizados nas argilas tropicais, enviando esse fósforo vital de volta para a planta hospedeira através do micélio, sustentando o metabolismo vegetal mesmo sob privação hídrica severa na camada superficial.

Simultaneamente à rede fúngica, a literatura enfatiza o impacto imenso das rizobactérias promotoras de crescimento de plantas. A colonização do sistema radicular por cepas específicas de bactérias, como as dos gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Azospirillum*, altera de maneira profunda o balanço hormonal da planta cultivada. A pesquisa relata que certas rizobactérias possuem a enzima ACC deaminase. Essa enzima bloqueia no solo a conversão do ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico no hormônio etileno. O etileno é conhecido como o hormônio do estresse e da senescência; quando os níveis de etileno disparam devido à seca ou ao calor, a planta aborta suas folhas e flores para economizar água, ceifando o potencial produtivo. Ao degradar o precursor do etileno, a bactéria promove um efeito antissenescência impressionante, mantendo a área foliar fotossinteticamente ativa por semanas adicionais de estiagem. Em contrapartida, essas mesmas bactérias sintetizam quantidades vultosas de fitormônios do grupo das auxinas, como o ácido indolacético. Esse aporte exógeno de auxina na rizosfera provoca uma ramificação intensa e agressiva das raízes laterais, aumentando a superfície de contato para a interceptação de nutrientes dispersos. Tais interações microbianas comprovam de forma insofismável que a eficiência no uso de nutrientes em condições de alto estresse é o resultado direto do equilíbrio biológico e estrutural do ecossistema rizosférico.

A avaliação crítica de todas essas estratégias deixa evidente que não existe uma solução tecnológica única capaz de contornar os desafios

impostos pelos extremos climáticos. O emprego isolado de um fertilizante de liberação controlada em um solo compactado, com barreira química de alumínio e desprovido de atividade microbiana, resultará em falha produtiva da mesma forma. A resiliência climática das culturas agrícolas tropicais depende impreterivelmente da integração holística das práticas discutidas. A correção do perfil em profundidade prepara a base física e química para a atuação do sistema radicular; o uso de fertilizantes eficientes sincroniza a disponibilidade de nutrientes com a necessidade da planta; a adubação específica com potássio, cálcio, zinco e silício ativa a blindagem física e o arsenal bioquímico de defesa antioxidante; e a manutenção do plantio direto aliada à inoculação microbiológica assegura o suprimento hídrico em microporos e modula positivamente os hormônios de resposta ao estresse. O cruzamento dos dados da literatura aponta que lavouras conduzidas sob essa multiplicidade de abordagens sistêmicas conseguem sustentar níveis de produtividade economicamente viáveis mesmo enfrentando anomalias pluviométricas e ondas de calor que dizimam parcelas vizinhas manejadas exclusivamente com a matriz tradicional de reposição de NPK superficial.

Diante do exposto, o que se projeta para o futuro do manejo agrônomo nas faixas intertropicais é uma mudança radical na maneira como o produtor agrícola, o engenheiro agrônomo e o pesquisador encaram a fertilidade. A transição deve ocorrer de uma nutrição voltada primariamente para o atingimento matemático de picos de máxima produção teórica para uma nutrição desenhada para a garantia da estabilidade produtiva. Alcançar o teto biológico da cultura em anos de clima perfeito será uma ocorrência secundária; o verdadeiro imperativo científico passa a ser a elevação do piso produtivo em anos de catástrofe climática. O custo

financeiro da adoção simultânea do gesso agrícola, da tecnologia de polímeros em fertilizantes, do fornecimento foliar ou radicular de agrossilícios e da bioprospecção de microrganismos de elite é invariavelmente compensado pela mitigação do risco de perda total da safra. A literatura, pautada por análises econômicas de longo prazo, defende que o investimento preventivo na estruturação da resiliência nutricional é a única apólice de seguro agronômico funcional em face da inevitabilidade das mudanças climáticas apontadas pelos painéis globais. O paradigma que encerra esta ampla discussão teórica é cristalino: a nutrição mineral das plantas consolida-se, definitivamente, não mais como a base estática de manutenção do ciclo vital, mas como o motor dinâmico e principal da adaptação biológica sustentável para a agricultura do amanhã.

5. CONCLUSÃO

A compilação exaustiva, a sistematização analítica e a avaliação crítica da literatura científica acerca da inter-relação entre os crescentes estresses abióticos de ordem climática e a dinâmica da nutrição mineral de plantas conduzem a conclusões de caráter peremptório sobre o futuro da exploração agropecuária nas regiões tropicais. Em primeiro lugar, conclui-se de forma inelutável que as mudanças climáticas globais, caracterizadas de forma prática e imediata pela elevação persistente das temperaturas médias, pela eclosão de ondas de calor de magnitude letal e pela drástica imprevisibilidade do ciclo hidrológico — traduzida em veranicos severos alternados com precipitações torrenciais —, impõem uma desestruturação sistêmica nos processos bioquímicos e físicos que governam a absorção e a utilização de nutrientes. A revisão bibliográfica demonstra, sem ambiguidades, que o estresse térmico severo e o déficit hídrico prolongado destroem a capacidade

intrínseca das plantas de realizar processos vitais elementares. Fenômenos como o fluxo de massa, responsável pelo transporte de nitrogênio e cálcio, e a difusão, essencial para a aquisição de fósforo e potássio, são reduzidos a taxas praticamente nulas quando a umidade do solo entra em declínio.

Conclui-se, ademais, que o impacto dos extremos climáticos vai muito além da mera paralisação do transporte de solutos na solução do solo. Há uma ruptura celular profunda documentada pela pesquisa contemporânea. A hiperfluidização das membranas celulares radiculares e a desnaturação das enzimas transportadoras induzem quadros de inanição nutricional aguda e efluxo passivo, onde íons previamente absorvidos com alto gasto energético são perdidos para a rizosfera. Mais alarmante é a conclusão de que as alterações abruptas nas propriedades termo-hídricas da matriz solo-raiz geram estresse oxidativo severo, inativando de forma sistêmica enzimas metabólicas cruciais, como a nitrato redutase, o que impede a assimilação de nutrientes e transforma um solo perfeitamente adubado, segundo os padrões químicos convencionais, em um ambiente estéril do ponto de vista fisiológico. Essa descontinuidade metabólica transforma o pacote tecnológico de alta resposta produtiva amplamente adotado ao longo das últimas décadas em um formidável fator de risco agrônomo, uma vez que o investimento financeiro aplicado na adubação de solo e cobertura não encontra respaldo biológico para ser convertido em biomassa colhível ou grãos.

Diante da falência comprovada dos modelos estáticos de recomendação de adubação, que pressupunham um ambiente de clima ótimo, conclui-se que a manutenção da viabilidade econômica e ecológica dos sistemas agrícolas de grande escala — vitais para a

estabilidade sociopolítica e alimentar de países como o Brasil e outras nações emergentes — exige uma imediata e radical reinvenção dos preceitos do manejo agrônomo. A maximização da eficiência no uso de nutrientes, neste novo normal climático, não será mais alcançada pela mera adição quantitativa de adubos sintéticos na linha de semeadura. Ao contrário, o sucesso da lavoura passará a depender visceralmente do refinamento estratégico da aplicação dos insumos, conjugado de maneira obrigatória ao fortalecimento estrutural, físico e biológico tanto do perfil do solo quanto da própria arquitetura sistêmica da planta. Conclui-se que a fertilidade não deve mais ser tratada como um atributo químico superficial confinado aos vinte centímetros aráveis do solo, mas como uma propriedade tridimensional profunda, construída intencionalmente pelo homem para assegurar a perenidade dos recursos hídricos.

Dessa premissa, deriva a conclusão inexorável de que o condicionamento profundo do perfil do solo constitui a base física intransponível para a resiliência agrícola. O investimento robusto na correção da acidez em subsuperfície, utilizando precipuamente ferramentas como o gesso agrícola para neutralizar o alumínio tóxico e fornecer cálcio livre em profundidade, é a única estratégia duradoura capaz de promover o alongamento radicular agressivo. Sem um sistema radicular profundo capaz de interceptar a água estocada nas camadas mais abissais do solo — água essa protegida da evaporação e das ondas de calor da superfície — não há possibilidade de manter o fluxo de seiva e a absorção ativa de minerais em períodos críticos de estiagem prolongada. Este avanço radicular profundo é o elo perdido que conecta a planta ao seu suprimento hídrico vital quando a superfície ferve, garantindo a turgescência, a fotossíntese e a sobrevivência reprodutiva. A

correção profunda consolida-se, portanto, não como um adendo corretivo secundário, mas como a pedra angular primária sobre a qual qualquer tecnologia de fertilização superior deve ser assentada.

Em relação ao manejo direto dos nutrientes essenciais, conclui-se que o uso indiscriminado de fontes altamente solúveis, como a ureia e o cloreto de potássio convencionais, representa uma vulnerabilidade inaceitável. O emprego mandatório de fontes nutricionais estabilizadas, protegidas por inibidores de nitrificação e urease, e de fertilizantes de liberação controlada envoltos em membranas poliméricas inteligentes constitui o manejo químico fundamental da agricultura adaptada ao clima. A sincronização induzida entre a liberação fracionada dos íons e a curva de demanda fisiológica da cultura anula drasticamente as taxas monumentais de lixiviação causadas por chuvas torrenciais concentradas e minimiza as perdas por volatilização gasosa sob altas temperaturas. Esta sincronia temporal e espacial é o único mecanismo viável para assegurar que a molécula de nitrogênio aplicada cumpra seu propósito biológico de formar proteínas, em vez de se tornar um potente e destrutivo gás de efeito estufa causador do próprio problema climático. Conclui-se que a tecnologia embarcada nos fertilizantes é o escudo químico contra a imprevisibilidade meteorológica aguda e violenta dos trópicos.

Simultaneamente à revolução das fontes químicas, a revisão da literatura impõe uma conclusão definidora sobre o papel da fisiologia da nutrição como mecanismo de defesa passiva e ativa da planta. A manipulação deliberada dos balanços catiônicos no interior do tecido celular estabeleceu-se como a fronteira de vanguarda para a indução de tolerância. É forçoso concluir que a nutrição focada em altos teores intracelulares de potássio, acima dos níveis

tradicionalmente definidos como adequados para ausência de sintomas visuais, é imperativa para conferir o poder de osmorregulação e o controle estomático preciso necessários para evitar a dessecação terminal sob déficits hídricos acentuados. Da mesma forma, conclui-se que a adoção sistêmica de elementos classicamente negligenciados, destacando-se o silício e, complementarmente, elementos como zinco e selênio, não é mais uma curiosidade acadêmica, mas um pilar produtivo. A constatação da capacidade do silício em depositar escudos amorfos duplos, atenuando estresses térmicos extremos e preservando água vital, juntamente com sua ação bioquímica como indutor da síntese de complexos enzimáticos de defesa antioxidante potentes, consagra a nutrição com elementos benéficos como uma ferramenta decisiva, barata e insubstituível para o controle dos radicais livres destrutivos.

As conclusões atingidas até aqui, de ordem química e física, desembocam invariavelmente na consolidação da biologia do solo como o moderador supremo da eficiência nutricional frente às mudanças climáticas. A vasta evidência levantada indica, de forma taxativa, que a superação da paralisação hídrica na camada arável durante secas prolongadas depende irrestritamente da integração simbiótica com as raízes. A potencialização das redes de hifas dos fungos micorrízicos arbusculares e a expansão agressiva do volume de exploração capilar via rizobactérias produtoras de fitormônios figuram como vias essenciais para a captação de nutrientes de baixíssima mobilidade e umidade retida em microporos inacessíveis pela morfologia vegetal primária. Mais contundente ainda é a conclusão de que estas microbiotas fundamentais, assim como a capacidade de infiltração hídrica do perfil e o controle térmico do solo, somente podem prosperar sob a égide incontestável do Sistema de Plantio Direto em bases puramente conservacionistas. A

presença contínua de biomassa morta (palhada) sobre o solo atua como o derradeiro regulador termodinâmico, garantindo a integridade ambiental da rizosfera que, de outra forma, seria carbonizada pela insolação impiedosa do verão tropical exacerbado.

Sintetizando a essência de todos os achados, conclui-se que a engenharia de precisão e a integração holística de processos agronômicos preditivos substituíram em definitivo a adubação empírica fundamentada apenas em índices extrativos. A adoção irrestrita destas tecnologias mitigadoras — que congregam a correção estrutural profunda, a tecnologia avançada de polímeros em fertilizantes, a blindagem antioxidante e termofísica via elementos benéficos e o fomento intensivo de microbiomas eficientes abrigados em sistemas conservacionistas — não pode mais ser classificada como uma opção tecnológica de alto padrão destinada unicamente à obtenção de recordes de tetos produtivos em concursos pontuais de produtores de elite. Trata-se, de fato e de direito científico, do requisito basal mínimo, da premissa de viabilidade primária para garantir a estabilidade das safras, a subsistência financeira e estrutural do setor primário agrícola, e, em última e magna instância, o pilar de sustentação para a segurança e soberania alimentar global. Diante de um cenário climático intrinsecamente caracterizado pela imprevisibilidade implacável, pela severidade extrema dos estresses abióticos e pela irreversibilidade de suas causas originais no curto prazo cronológico, a nutrição mineral de plantas ergue-se como a principal apólice de seguro biológico, garantindo a sustentabilidade duradoura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bindraban, P. S., Dimkpa, C., Nagarajan, L., Roy, A., & Rabbinge, R. (2015). Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*, 51(8), 897-911.

Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought: from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264.

Dixon, R. K., Smith, J. B., & Guill, S. (2009). Life on the edge: vulnerability and adaptation of African ecosystems to global climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 8(2), 93-113.

Epstein, E., & Bloom, A. J. (2006). *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. Londrina: Editora Planta.

Fageria, N. K. (2009). *The use of nutrients in crop plants*. Boca Raton: CRC Press.

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., ... & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147.

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager Møller, I., & White, P. (2012). Functions of macronutrients. In: Marschner, H. *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed., pp. 135-189). San Diego: Academic Press.

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC.

Malavolta, E. (2006). Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres.

Marschner, H. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). San Diego: Academic Press.

Novais, R. F., Alvarez V., V. H., Barros, N. F., Fontes, R. L. F., Cantarutti, R. B., & Neves, J. C. L. (2007). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). Fisiologia e desenvolvimento vegetal (6ª ed.). Porto Alegre: Artmed Editora.

Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. Environmental and Experimental Botany, 61(3), 199-223.

¹ Engenheiro Agrônomo pela URI Câmpus Santiago - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões