

CASSIO PEREIRA HONDA FILHO

Manejo da Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral na Cafeicultura



EDITORA
SCHREIBEN



CASSIO PEREIRA HONDA FILHO

Manejo da Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral na Cafeicultura



EDITORA
SCHREIBEN

2025

© Cassio Pereira Honda Filho - 2025
Editoração e capa: Schreiber
Imagem da capa: ALEXSTUDIO - Freepik.com
Revisão: o autor
Livro publicado em: 29/09/2025
Termo de publicação: TP0902025

Conselho Editorial (Editora Schreiber):

Dr. Adelar Heinsfeld (UPF)
Dr. Airtton Spies (EPAGRI)
Dra. Ana Carolina Martins da Silva (UERGS)
Dr. Cleber Duarte Coelho (UFSC)
Dr. Daniel Marcelo Loponte (CONICET – Argentina)
Dr. Deivid Alex dos Santos (UEL)
Dr. Douglas Orestes Franzen (UCEFF)
Dr. Eduardo Ramón Palermo López (MPR - Uruguai)
Dr. Fábio Antônio Gabriel (SEED/PR)
Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes (UENP)
Dra. Ivânia Campigotto Aquino (UPF)
Dr. João Carlos Tedesco (UPF)
Dr. Joel Cardoso da Silva (UFPA)
Dr. José Antonio Ribeiro de Moura (FEEVALE)
Dr. Klebson Souza Santos (UEFS)
Dr. Leandro Hahn (UNIARP)
Dr. Leandro Mayer (SED-SC)
Dra. Marcela Mary José da Silva (UFRB)
Dra. Marciane Kessler (URI)
Dr. Marcos Pereira dos Santos (FAQ)
Dra. Natércia de Andrade Lopes Neta (UNEAL)
Dr. Odair Neitzel (UFFS)
Dr. Waniilton Dudek (UNESPAR)

Esta obra é uma produção independente. A exatidão das informações, opiniões e conceitos emitidos, bem como da procedência e da apresentação das tabelas, quadros, mapas, fotografias e referências é de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Editora Schreiber
Linha Cordilheira - SC-163
89896-000 Itapiranga/SC
Tel: (49) 3678 7254
editoraschreiber@gmail.com
www.editoraschreiber.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

H771 Honda Filho, Cassio Pereira.
Manejo da fertilidade do solo e nutrição mineral na cafeicultura / Cassio Pereira Honda Filho. – Itapiranga, SC : Schreiber, 2025.
80 p. ; e-book.
Inclui bibliografia
E-book no formato PDF.
ISBN: 978-65-5440-519-5
DOI: 10.29327/5674940
1. Cafeicultura - Fertilizantes e adubação. 2. Fertilidade do solo.
3. Nutrição mineral de plantas. 4. Café (Planta) - Nutrição. I. Título.

CDD 633.738

Bibliotecária responsável Juliane Steffen CRB14/1736

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO À	
FERTILIDADE DO SOLO NA CAFEICULTURA.....	5
CAPÍTULO 2	
MACRONUTRIENTES ESSENCIAIS PARA O CAFEIEIRO.....	9
CAPÍTULO 3	
MICRONUTRIENTES E	
SEU PAPEL FISIOLÓGICO NA CAFEICULTURA.....	17
CAPÍTULO 4	
DINÂMICA DE NUTRIENTES NO PERFIL DO SOLO E A	
INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS.....	27
CAPÍTULO 5	
MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO	
E DO ESTADO NUTRICIONAL DO CAFEIEIRO.....	35
CAPÍTULO 6	
PRÁTICAS DE CALAGEM E GESSAGEM NA CAFEICULTURA:	
EFEITOS E RECOMENDAÇÕES.....	39
CAPÍTULO 7	
MANEJO DA MATÉRIA ORGÂNICA E	
CARBONO NO SOLO DE CAFEICULTURA.....	47
CAPÍTULO 8	
NUTRIÇÃO MINERAL E	
SEUS EFEITOS NA QUALIDADE DO CAFÉ.....	53
CAPÍTULO 9	
RECOMENDAÇÃO TÉCNICA E	
PRÁTICA DE ADUBAÇÃO PARA CAFEIEIROS.....	57

CAPÍTULO 10

DESAFIOS FUTUROS E INOVAÇÕES EM FERTILIDADE E NUTRIÇÃO NA CAFEICULTURA.....	65
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
AGRADECIMENTOS.....	71
REFERÊNCIAS.....	73

INTRODUÇÃO À FERTILIDADE DO SOLO NA CAFEICULTURA

A cafeicultura no Brasil emergiu como atividade agrícola de destaque desde o século XIX, consolidando-se como um dos principais produtos de exportação nacional. Contudo, os solos inicialmente utilizados apresentavam, em sua maioria, baixa fertilidade natural ou foram rapidamente exauridos por práticas agrícolas rudimentares. A ausência de conhecimento técnico à época resultava na adoção de métodos empíricos como o pousio, a sucessão de culturas e o uso esporádico de esterco animal, que, embora minimamente eficazes, não eram suficientes para sustentar altos níveis de produtividade ao longo do tempo. O quadro começou a se modificar com o avanço da ciência do solo no Brasil, especialmente a partir da segunda metade do século XX, quando surgiram instituições voltadas ao estudo sistemático da fertilidade e do manejo adequado dos solos agrícolas.

Foi com a criação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, a consolidação do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e, mais tarde, com o fortalecimento da Embrapa Solos e da Embrapa Café, que o país passou a contar com um corpo técnico-científico capaz de fundamentar a transição da cafeicultura tradicional para uma agricultura tecnificada. A fundação da Embrapa, em 1973, representa um divisor de águas nesse processo. A partir dela, as recomendações sobre adubação, correção de acidez, uso de calcário e gesso agrícola, bem como o manejo de macro e micronutrientes, passaram a ser embasadas em evidências experimentais e publicadas em boletins técnicos e manuais de campo. O Manual do Café e os documentos do Consórcio Pesquisa Café tornaram-se referência nacional em manejo da fertilidade, orientando produtores sobre boas práticas que combinam ciência e eficiência agrônoma.

Nas últimas décadas, uma nova abordagem ganhou destaque: a chamada “construção da fertilidade do solo”. Ao contrário do manejo corretivo isolado, essa estratégia pressupõe o preparo antecipado do ambiente edáfico para que o cafeeiro se desenvolva sob condições ideais desde a implantação da lavoura. Isso envolve a aplicação criteriosa de corretivos e fertilizantes, a incorporação de matéria orgânica, a adoção de culturas de cobertura como braquiária entre as linhas e a observância rigorosa dos chamados 4 Cs: a quantidade Certa, a época Certa, o local Certo e a fonte Correta de nutrientes. Ao propor essa visão integrada, pesquisadores como Reis, Guimarães e Oliveira contribuíram para consolidar um modelo produtivo que alia eficiência e sustentabilidade.

A compreensão da fertilidade do solo como conceito multidimensional levou, por sua vez, a uma valorização crescente da qualidade física do solo. Estudos sobre agregação, porosidade, densidade e infiltração de água mostraram que a estrutura do solo influencia diretamente a dinâmica de nutrientes e o crescimento radicular do cafeeiro. Por isso, práticas conservacionistas como a descompactação mecânica em profundidade, o cultivo mínimo, o uso de plantas de cobertura e a manutenção de palhada passaram a integrar o pacote tecnológico da cafeicultura moderna. Essa abordagem permite maior aproveitamento dos fertilizantes aplicados, reduz perdas por lixiviação e melhora o desempenho fisiológico da planta.

A matéria orgânica passou a ser compreendida como um elemento central da fertilidade, não apenas por seus efeitos químicos diretos, como aumento da CTC, liberação gradual de nutrientes e complexação de metais tóxicos, mas também por suas funções físicas e biológicas. Ela melhora a retenção de água, favorece a atividade microbiana e contribui para a estabilidade da estrutura do solo. Pesquisas recentes realizadas na região mogiana de São Paulo, por exemplo, demonstraram que lavouras de café sob manejo intensivo apresentam menor conteúdo de carbono orgânico e maior degradação estrutural, quando comparadas a áreas com cobertura perene ou vegetação nativa. Isso reforça a importância da matéria orgânica não só como insumo agrônomo, mas também como indicador de sustentabilidade.

O monitoramento periódico da fertilidade tornou-se parte integrante do calendário da cafeicultura tecnificada. Recomenda-se que a análise de

solo seja realizada após a colheita, nos meses de julho e agosto, permitindo ajustar o plano de adubação de acordo com as perdas ocasionadas pela produção. Esses ajustes são feitos com base em princípios clássicos da fertilidade, como a Lei do Mínimo, que estabelece que o nutriente mais limitante é aquele que determina a produtividade, e a Lei dos Incrementos Decrescentes, segundo a qual aumentos sucessivos de adubação tendem a gerar retornos progressivamente menores. Ao integrar esses conceitos com dados locais e análises laboratoriais, o produtor reduz custos e impactos ambientais sem comprometer o rendimento da lavoura.

Um avanço recente nos estudos de fertilidade do solo em cafeeiros foi o experimento ClimapestFACE (Free Air Carbon-Dioxide Enrichment), conduzido pela Embrapa Meio Ambiente, que simulou o aumento da concentração atmosférica de CO₂ em lavouras com braquiária nas entrelinhas. Os resultados mostraram redução do fósforo disponível e alterações na dinâmica do potássio, evidenciando a necessidade de ajustes no manejo da adubação frente às mudanças climáticas. Esses achados confirmam o caráter dinâmico da fertilidade do solo, influenciado por fatores edafoclimáticos e pelo sistema de cultivo.

A fertilidade do solo na cafeicultura brasileira é sustentada por três pilares: químico (pH, macro e micronutrientes), físico (estrutura, porosidade, retenção hídrica e compactação) e biológico (matéria orgânica, atividade microbiana e ciclagem de nutrientes). Estudos realizados em Muzambinho (MG) demonstraram que lavouras sombreadas apresentam melhor equilíbrio químico e maior estabilidade física em comparação às cultivadas a pleno sol. O sombreamento contribui para regular a temperatura do solo e reduzir a evaporação, favorecendo o microclima edáfico, a atividade microbiana e a disponibilidade de nutrientes. Além disso, a adoção de gramíneas como cobertura nas entrelinhas promove a formação de macroporos e microporos, o aumento da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, fortalecendo os atributos físico-químicos e biológicos do solo. Considerando que muitos solos cafeeiros no Brasil são naturalmente ácidos e de baixa fertilidade, práticas como calagem, adubação balanceada e manejo do perfil profundo são essenciais para manter e aprimorar esses três pilares de forma sustentável.

A produção científica nacional vem fortalecendo essa abordagem integradora. Trabalhos recentes abordam, por exemplo, os efeitos de diferentes fontes e doses de fósforo sobre o desenvolvimento inicial do cafeeiro, os impactos da extração simultânea de cátions com diferentes soluções extratoras e o uso de fertilizantes organominerais como alternativa promissora para o equilíbrio nutricional em viveiros e áreas recém-implantadas. A conjugação de dados experimentais, análises econômicas e indicadores de sustentabilidade ambiental tem sido valorizada como critério de validação de novas tecnologias.

Assim, o histórico do estudo da fertilidade do solo na cafeicultura brasileira mostra uma trajetória de profunda evolução técnica e científica. Partindo de práticas empíricas, avançou-se para métodos baseados em diagnóstico, prognóstico e monitoramento, culminando em modelos de manejo que aliam alta produtividade, conservação de recursos naturais e mitigação de impactos ambientais. O sucesso dessa trajetória deve-se, em grande parte, ao trabalho contínuo de pesquisa e extensão de instituições como a Embrapa, o IAC, universidades federais e estaduais, cooperativas e empresas do setor produtivo. Diante dos desafios impostos pela intensificação agrícola e pelas mudanças climáticas, é imperativo manter o investimento em ciência do solo, valorizando a fertilidade como base de sistemas produtivos resilientes e sustentáveis.

MACRONUTRIENTES ESSENCIAIS PARA O CAFEIEIRO

A nutrição mineral é um dos pilares da produtividade dos cafezais. A planta de café demanda grandes quantidades de nutrientes, especialmente durante o crescimento vegetativo, formação e enchimento de grãos. Entre os elementos essenciais, os macronutrientes são exigidos em maiores quantidades e desempenham papéis fisiológicos fundamentais nas estruturas vegetativas, no metabolismo e na reprodução. Em cultivos comerciais, deficiências de macronutrientes prejudicam o desenvolvimento vegetativo, a resistência a estresses e a qualidade e rendimento dos grãos.

No manejo moderno da cafeicultura, a nutrição com macronutrientes baseia-se em diagnósticos como análise de solo e de tecido foliar, além de aplicação estratégica de fertilizantes conforme a demanda da planta, dinâmica dos nutrientes no solo e perdas por lixiviação ou volatilização.

1. NITROGÊNIO (N)

Funções na planta de café

O nitrogênio é o nutriente mais exigido pela planta de café, desempenhando papel fundamental na construção de estruturas celulares e no metabolismo energético. Ele compõe aminoácidos, proteínas, enzimas, ácidos nucleicos (DNA e RNA) e nucleotídeos como ATP e NADPH, sendo também elemento essencial da molécula de clorofila. Sua presença influencia diretamente a taxa de fotossíntese líquida, promovendo maior acúmulo de biomassa, desenvolvimento radicular e expansão foliar. No cafeeiro, o nitrogênio estimula a emissão de ramos ortotrópicos e plagiotrópicos, conferindo arquitetura equilibrada à copa e favorecendo a

intercepção luminosa. Além disso, está associado à regulação de genes relacionados à senescência, contribuindo para a longevidade funcional das folhas, o que repercute diretamente no rendimento em floradas sucessivas.

Sintomas de deficiência

- Clorose generalizada nas folhas mais velhas, com coloração amarelada uniforme.
- Crescimento reduzido da planta e encurtamento dos internódios.
- Redução significativa da produção e da qualidade dos frutos.

Fontes comuns de adubação

- Ureia (45% N)
- Nitrato de amônio (33% N)
- Sulfato de amônio (21% N)
- Fontes orgânicas: tortas vegetais, compostos orgânicos, esterco curtido.

2. FÓSFORO (P)

Funções na planta de café

O fósforo é essencial para o metabolismo energético e para os processos bioquímicos vitais à fisiologia do cafeeiro. Ele participa da composição de ATP, NADP⁺, coenzimas e ácidos nucleicos, sendo fundamental para a divisão celular e o crescimento dos tecidos meristemáticos. Sua presença adequada favorece o desenvolvimento do sistema radicular, especialmente das raízes laterais, que garantem melhor absorção de água e nutrientes.

Sintomas de deficiência

- Crescimento retardado, especialmente das raízes.
- Folhas verde-azuladas com tonalidade arroxeada nas margens.
- Atraso no florescimento e redução no pegamento de frutos.
- Redução da produção.

Fontes comuns de adubação

- Superfosfato simples (18% P_2O_5)
- Superfosfato triplo (41-45% P_2O_5)
- Fosfato natural reativo (dependente de pH e P remanescente)
- MAP – Fosfato monoamônico (11% N; 52% P_2O_5)

3. POTÁSSIO (K)

Funções na planta de café

O potássio, embora não componha estruturas orgânicas da planta, é determinante para a funcionalidade celular no cafeeiro. Atua como ativador de dezenas de sistemas enzimáticos, participa da regulação do potencial osmótico celular e desempenha papel central no controle da abertura e fechamento estomático, influenciando diretamente a transpiração e a eficiência do uso da água. No metabolismo, contribui para a translocação de fotoassimilados, facilitando o transporte de carboidratos dos tecidos vegetativos para os frutos, processo essencial para o enchimento uniforme dos grãos e para a sincronização da maturação. Em condições adversas, o potássio auxilia na manutenção do turgor e na tolerância ao estresse hídrico e à salinidade, além de reduzir a suscetibilidade do cafeeiro a doenças foliares, como a cercosporiose. Também está envolvido no metabolismo de açúcares e compostos fenólicos, os quais podem influenciar atributos relacionados à qualidade da bebida.

Sintomas de deficiência

- Clorose marginal nas folhas mais velhas, seguida de necrose.
- Grãos malformados e chochos.
- Queda prematura de folhas e frutos.

Fontes comuns de adubação

- Cloreto de potássio (60% K_2O)
- Sulfato de potássio (50% K_2O e 17% S)
- Nitrato de potássio (13% N e 44% K_2O)
- Cinzas vegetais (em cultivos agroecológicos)

4. CÁLCIO (Ca)

Funções na planta de café

O cálcio é um nutriente estrutural de alta relevância para o cafeeiro, compondo as lamelas médias das paredes celulares na forma de pectato de cálcio, o que confere rigidez e coesão aos tecidos vegetais. Atua também como segundo mensageiro intracelular em processos de crescimento e defesa, participando da regulação da expressão gênica e da sinalização entre organelas. Sua disponibilidade é essencial para o desenvolvimento das gemas apicais e florais, garantindo a continuidade do crescimento vegetativo e reprodutivo. Além disso, o cálcio estabiliza as membranas plasmáticas e modula a atividade de diversas enzimas, favorecendo maior tolerância a desequilíbrios iônicos e à toxidez por alumínio em solos ácidos. Níveis adequados de cálcio estão associados à integridade do sistema radicular e ao maior pegamento de flores e frutos, contribuindo para a produtividade e longevidade do cafeeiro.

Sintomas de deficiência

- Necrose e morte do meristema apical (gemas).
- Folhas jovens deformadas, espessas e com clorose.
- Sistema radicular com crescimento atrofiado.
- Redução do vingamento da florada e aumento da queda de frutos.

Fontes comuns de adubação

- Calcário dolomítico ou calcítico
- Gesso agrícola (também fonte de enxofre)
- Nitrato de cálcio (15,5% N e 19% Ca)
- Fosfato de Araxá (com teor secundário de Ca)

5. MAGNÉSIO (Mg)

Funções na planta de café

O magnésio está intimamente ligado à fotossíntese no cafeeiro, pois constitui o átomo central da molécula de clorofila, sendo indispensável para

a absorção de luz e a fixação de carbono atmosférico. Atua como cofator de diversas enzimas envolvidas na transferência de fosfato, na síntese de carboidratos e no metabolismo de ácidos nucleicos. É fundamental para a ativação da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), principal enzima do ciclo de Calvin, e participa do transporte de sacarose, o principal fotoassimilado direcionado aos frutos em desenvolvimento. No cafeeiro, o magnésio apresenta alta mobilidade no floema, permitindo a redistribuição de nutrientes para órgãos com maior demanda, especialmente durante a frutificação. A adequada nutrição com magnésio previne desequilíbrios nutricionais, principalmente com potássio e cálcio, e contribui para a formação de grãos com melhor acúmulo de açúcares e compostos de qualidade, potencialmente elevando o padrão sensorial da bebida.

Sintomas de deficiência

- Clorose internerval em folhas mais velhas.
- Necrose marginal e queda precoce de folhas em casos severos.
- Redução da taxa fotossintética e do vigor vegetativo.

Fontes comuns de adubação

- Sulfato de magnésio (9% Mg e 13% S).
- Calcário dolomítico (em calagens).
- Termofosfatos magnesianos.
- Fertilizantes foliares específicos (Mg quelatado, sulfato, nitrato, suspensão concentrada).

6. ENXOFRE (S)

Funções na planta de café

O enxofre desempenha funções essenciais na bioquímica do cafeeiro, integrando aminoácidos sulfurados como cisteína e metionina e participando da composição de vitaminas como tiamina (B₁) e biotina. É fundamental para a conformação tridimensional de proteínas, por meio de pontes dissulfeto, e para a atividade de enzimas envolvidas na assimilação de nitrogênio e no metabolismo redox. No cafeeiro, o suprimento adequado

de enxofre contribui para a síntese de compostos secundários, alguns dos quais atuam como precursores de aroma e sabor na bebida, e favorece mecanismos antioxidantes associados à tolerância a estresses abióticos. A deficiência de S reduz a eficiência da nutrição nitrogenada e compromete a síntese de proteínas e metabólitos essenciais, resultando em menor vigor e produtividade.

Sintomas de deficiência

- Clorose generalizada em folhas jovens, semelhante à deficiência de nitrogênio.
- Redução do crescimento e desenvolvimento vegetativo.
- Diminuição na síntese de compostos secundários.

Fontes comuns de adubação

- Sulfato de amônio (21% N e 24% S)
- Sulfato de potássio (50% K₂O e 17% S)
- Gesso agrícola (15% S)
- Elemento elementar (enxofre pastilhado)

Silício na cafeicultura: elemento benéfico com potencial estratégico

Embora não seja considerado essencial, o silício (Si) é classificado como elemento benéfico para diversas culturas, inclusive o cafeeiro, devido à sua atuação na tolerância a estresses bióticos e abióticos. O Si se deposita nas paredes celulares na forma de sílica amorfa, aumentando a rigidez estrutural, reduzindo a perda de água por transpiração e dificultando a penetração de patógenos. Também participa de processos de defesa induzida, estimulando a síntese de fitoalexinas, compostos fenólicos e lignina. Em condições tropicais, sua aplicação pode resultar em maior eficiência fotossintética, melhor aproveitamento de nutrientes, sincronia de maturação e maior resiliência da planta frente a estresses.

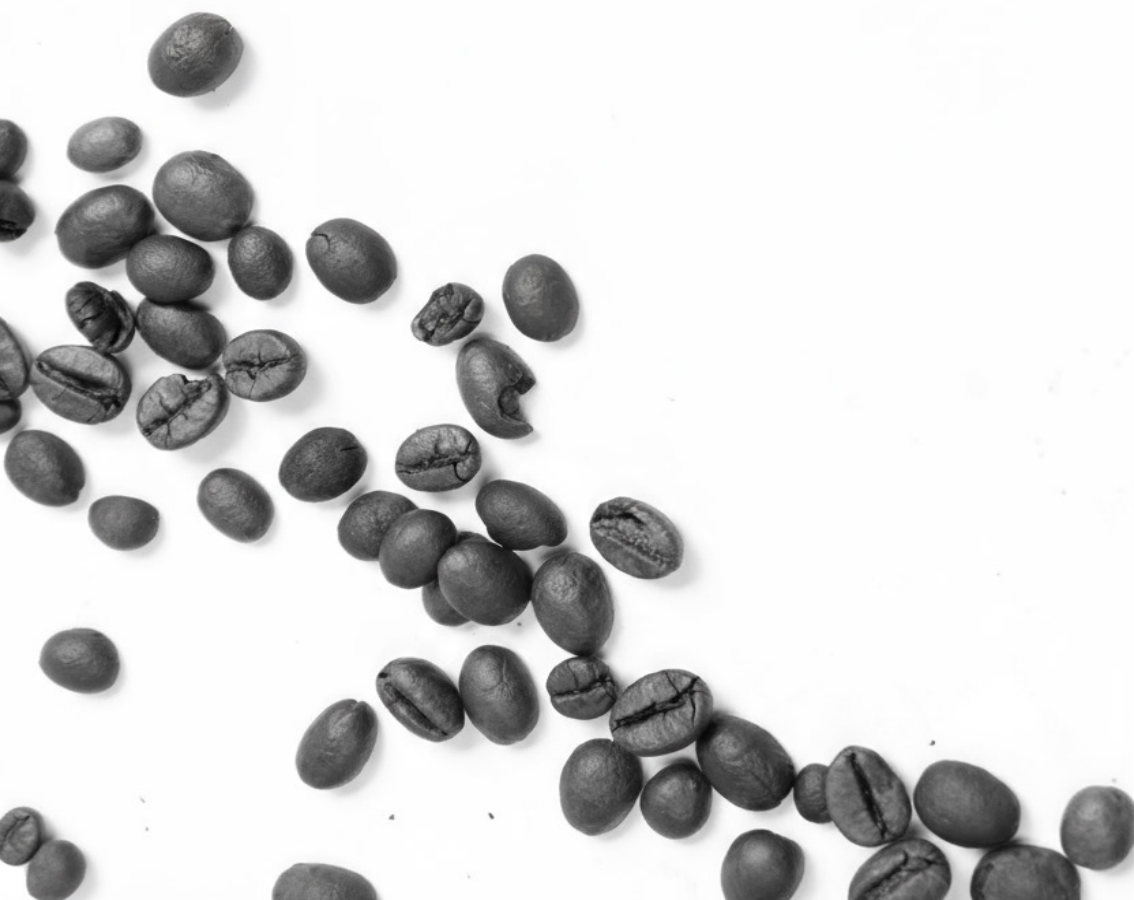
Sua aplicação está associada a:

- **Redução de doenças:** menor incidência e severidade de ferrugem (*Hemileia vastatrix*) e cercosporiose (*Cercospora coffeicola*).

- **Tolerância ao déficit hídrico:** maior rigidez celular, melhor controle estomático e ativação de enzimas antioxidantes.
- **Melhoria da qualidade e uniformidade da maturação:** aumento da eficiência fotossintética, translocação de assimilados e sincronia no desenvolvimento dos frutos.
- **Estabilidade fotossintética:** preservação de cloroplastos, retardamento da senescência foliar e ativação de enzimas como superóxido dismutase e catalase.

Fontes utilizadas

- Silicato de potássio (via foliar)
- Escórias siderúrgicas (via solo)
- Ácido ortossilícico estabilizado
- Fertilizantes com Si solúvel associados a K ou Ca



MICRONUTRIENTES E SEU PAPEL FISIOLÓGICO NA CAFEICULTURA

O cafeeiro (*Coffea arabica*) requer, além dos macroelementos essenciais (N, P, K, Ca, Mg e S), um conjunto de micronutrientes minerais, dentre eles: boro (B), cloro (Cl), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo) e níquel (Ni), além de elementos benéficos como o cobalto (Co). Embora demandados em quantidades extremamente reduzidas (mg kg⁻¹ de matéria seca), esses elementos desempenham papéis determinantes no desenvolvimento saudável das plantas, no rendimento e na qualidade sensorial tanto do fruto verde quanto do grão beneficiado. A absorção, a mobilidade interna e as interações entre esses nutrientes influenciam diretamente a sanidade do cafeeiro, a eficiência fisiológica e a resistência a doenças e a estresses bióticos e abióticos.

FERRO (Fe)

Função fisiológica

No cafeeiro (*Coffea arabica*), o ferro (Fe) é essencial para a fotossíntese e a respiração celular. Integra proteínas ferro-enxofre (Fe-S), citocromos e diversas redutases, participando ativamente da cadeia transportadora de elétrons tanto na fotossíntese (fotossistemas I e II) quanto na respiração mitocondrial. O Fe é indispensável para a atividade da redutase do nitrato e da nitrito redutase, além de atuar na regeneração de sistemas antioxidantes, como catalase, peroxidase e superóxido dismutase Fe-dependente. Sua adequada disponibilidade assegura eficiência energética, assimilação de nitrogênio e manutenção do crescimento vegetativo. No solo, a forma Fe²⁺ (ferrosa) é mais solúvel e é mobilizada principalmente por ácidos orgânicos e fenóis exsudados pelas raízes, o que favorece sua absorção, especialmente em solos ácidos.

Sintomas de deficiência

Caracteriza-se por clorose internerval acentuada em folhas jovens, devido à baixa mobilidade do Fe no floema, podendo evoluir para quase total ausência de clorofila. Em casos severos, observa-se murchamento parcial dos folíolos, alterações na ultraestrutura dos cloroplastos e redução da taxa fotossintética, resultando em menor crescimento vegetativo e maior suscetibilidade a estresses bióticos e abióticos.

Fitotoxicidade

O excesso de ferro, mais comum em solos hidromórficos ou com pH muito baixo, pode provocar toxicidade radicular, induzir a produção excessiva de radicais livres (via reação de Fenton) e gerar antagonismo na absorção de manganês (Mn) e zinco (Zn).

Fontes de adubação

Sulfato ferroso, cloreto ferroso e quelatos de Fe (EDTA, DTPA, EDDHA), sendo os últimos mais eficientes em solos com pH elevado. A aplicação pode ser via solo (em cobertura ou em covas) ou via foliar em situações de deficiência aguda, respeitando doses para evitar fitotoxicidade.

MANGANÊS (Mn)

Função fisiológica

O manganês (Mn) é componente essencial do complexo de evolução do oxigênio (*Oxygen Evolving Complex* – OEC) no fotossistema II, onde atua como cofator na fotólise da água, promovendo a liberação de oxigênio molecular, prótons e elétrons para a cadeia transportadora. Integra a enzima superóxido dismutase dependente de manganês (Mn-SOD), crucial para a desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (ROS) nos cloroplastos. Atua como ativador ou cofator de mais de 35 enzimas, incluindo aquelas envolvidas na biossíntese de lignina, flavonoides e aminoácidos aromáticos (via shikimato), contribuindo para a resistência estrutural e a defesa contra patógenos. Além disso, o Mn está associado à regulação da formação da

parede celular e ao funcionamento do meristema apical, especialmente em tecidos de crescimento ativo.

Sintomas de deficiência

A deficiência de Mn no cafeeiro manifesta-se inicialmente por clorose internerval em folhas jovens, geralmente com aspecto mais claro que a deficiência de Fe, podendo evoluir para manchas necróticas puntiformes. Há redução significativa da taxa fotossintética, diminuição no acúmulo de carboidratos e alterações na ultraestrutura dos cloroplastos, que podem ser irreversíveis em casos graves.

Fitotoxicidade

O excesso de manganês, mais comum em solos ácidos e mal drenados, pode reduzir a absorção de ferro (Fe) e zinco (Zn) por antagonismo iônico. Sintomas foliares incluem manchas pardo-enegrecidas, necrose marginal e, em casos severos, deformações foliares. Em níveis tóxicos, também pode afetar negativamente o sistema radicular.

Fontes de adubação

Sulfato de manganês, cloreto de manganês e quelatos de Mn (ex.: EDTA-Mn), aplicados via solo (em sulco ou cova) ou via foliar, conforme diagnose visual ou análise foliar/solo. Em solos ácidos, recomenda-se manejo conjunto da calagem para evitar toxidez.

COBRE (Cu)

Função fisiológica

O cobre (Cu) é micronutriente essencial que atua como cofator da plastocianina, proteína chave no transporte de elétrons entre o fotossistema II e o fotossistema I, etapa crítica da fotossíntese. Participa de diversas enzimas oxidoredutases, incluindo a superóxido dismutase Cu/Zn (Cu/Zn-SOD), que atua na detoxificação de espécies reativas de oxigênio (ROS), protegendo contra estresses oxidativos. Enzimas dependentes de Cu, como a polifenol oxidase, catalisam a oxidação de compostos fenólicos, promovendo a lignificação

e reforçando a rigidez e a integridade da parede celular, especialmente nos tecidos xilemáticos e floemáticos. Dessa forma, o Cu integra processos relacionados ao metabolismo energético, à formação e ao fortalecimento de tecidos condutores e à defesa enzimática contra patógenos.

Sintomas de deficiência

A deficiência de Cu no cafeeiro manifesta-se por folhas pálidas, frequentemente com margens amarronzadas ou necrosadas, crescimento atrofiado e encurtamento de internódios. Pode ocorrer acúmulo de fenóis não oxidados, menor lignificação e maior suscetibilidade a infecções fúngicas e bacterianas. Em casos severos, ramos jovens podem apresentar murcha e necrose apical.

Fitotoxicidade

Excessos de Cu, mais comuns em solos com histórico de uso intenso de fungicidas cúpricos ou com baixa capacidade de adsorção, podem causar antagonismo com zinco (Zn) e ferro (Fe), reduzindo sua absorção. A fitotoxidez pode se manifestar como clorose generalizada e redução do crescimento devido ao bloqueio de outros micronutrientes.

Fontes de adubação

Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), óxido cúprico (CuO), óxido cuproso (Cu_2O), oxiclreto de cobre ($3\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCl}_2$) e nitrato de cobre [$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$], aplicados preferencialmente de forma localizada e em doses controladas para evitar acúmulo excessivo no solo.

ZINCO (Zn)

Função fisiológica

No cafeeiro (*Coffea arabica*), o zinco (Zn) atua como cofator essencial em diversas enzimas relacionadas à fotossíntese, ao metabolismo de hormônios vegetais e ao equilíbrio antioxidante. É componente fundamental do carbonato anidrase, que catalisa a interconversão entre CO_2 e bicarbonato, favorecendo a assimilação de carbono nas folhas.

Participa da superóxido dismutase Zn/Cu (Cu/Zn-SOD), responsável pela neutralização de radicais superóxido (O_2^-), protegendo as células contra danos oxidativos.

O Zn também estimula a biossíntese de auxinas a partir do triptofano, favorecendo o crescimento vegetativo, a elongação de entrenós e a formação de raízes laterais, impactando diretamente a arquitetura da planta. Além disso, níveis adequados de Zn preservam a integridade das membranas celulares e reduzem a peroxidação lipídica, contribuindo para a eficiência fisiológica e a produtividade sustentada.

Estudos mostram que a aplicação foliar de Zn, especialmente na forma de sulfato de zinco ou de nanopartículas de óxido de zinco (ZnO), aumenta a concentração foliar do nutriente, eleva as taxas fotossintéticas, incrementa o teor de clorofila e promove maior acúmulo de biomassa foliar.

Sintomas de deficiência

Folhas menores e estreitas, clorose generalizada ou internerval, encurtamento de entrenós, má divisão e expansão celular, além de acúmulo de açúcares não metabolizados nos tecidos afetados.

Fitotoxicidade

O excesso de Zn pode retardar o desenvolvimento vegetal, antagonizar a absorção de ferro (Fe) e cobre (Cu) e induzir necroses ou sintomas visuais semelhantes à deficiência de outros micronutrientes.

Fontes de adubação

Sulfato de zinco ($ZnSO_4$), óxido de zinco (ZnO), cloreto de zinco ($ZnCl_2$), nitrato de zinco [$Zn(NO_3)_2$] e quelatos sintéticos como Zn-EDTA. A aplicação pode ser feita via solo ou via foliar, devendo-se ajustar as doses conforme análise de solo e tecido para evitar toxicidade.

BORO (B)

Função fisiológica

Apesar de não integrar enzimas diretamente, o boro (B) é crucial na formação de pontes entre moléculas de pectina da parede celular, estabilizando sua estrutura e permeabilidade. o que confere estabilidade e regula a porosidade da parede celular. Desempenha papel importante no transporte de carboidratos via floema, na manutenção da integridade das membranas celulares e na viabilidade e crescimento do tubo polínico, sendo indispensável para a fertilização e o enchimento de frutos. No cafeeiro (*Coffea arabica*), o boro influencia diretamente o vingamento de florada, o pegamento e a uniformidade dos frutos, impactando a qualidade final do grão. Isso ocorre principalmente devido à sua participação na translocação de açúcares, na divisão celular e na diferenciação dos meristemas.

Sintomas de deficiência

Abortamento floral, queda de flores e frutos, morte do meristema apical, deformação dos frutos, folhas novas espessas e quebradiças, e menor intensidade de frutificação. Em casos graves, pode ocorrer paralisação do crescimento apical.

Fitotoxicidade

O excesso de boro, geralmente associado a aplicações foliares ou adubações mal calibradas, provoca necrose das margens foliares, clorose generalizada e redução acentuada da produtividade. Como a faixa entre deficiência e toxicidade é estreita, a aplicação deve ser rigorosamente controlada.

Fontes de adubação

Ácido bórico, bórax (tetraborato de sódio), e ulexita (minerais boratados, utilizados preferencialmente via solo). As aplicações podem ser realizadas via solo, em doses baixas e bem distribuídas, e/ou via foliar em situações de deficiência diagnosticada.

MOLIBDÊNIO (Mo)

Função fisiológica

O molibdênio (Mo) é um micronutriente essencial que integra o centro ativo de enzimas-chave no metabolismo do nitrogênio, como a nitrato redutase (NR) e a nitrogenase. A nitrato redutase catalisa a redução do nitrato (NO_3^-) a nitrito (NO_2^-), que posteriormente é convertido a amônio (NH_4^+), etapa fundamental para a síntese de aminoácidos e proteínas. A nitrogenase, presente em microrganismos fixadores de nitrogênio, depende de um cofator molibdênio-ferro (FeMo-co), sendo crucial para a fixação biológica do nitrogênio (FBN) em sistemas consorciados com leguminosas. No cafeeiro, embora a FBN direta não ocorra, o Mo otimiza o aproveitamento do nitrogênio proveniente tanto da adubação mineral quanto da mineralização da matéria orgânica, favorecendo a síntese proteica e a fotossíntese. Sua absorção ocorre predominantemente na forma de molibdato (MoO_4^{2-}), que apresenta mobilidade tanto no xilema quanto no floema, permitindo redistribuição interna e contribuição para a eficiência de uso do N.

Sintomas de deficiência

Clorose difusa em folhas mais velhas, redução no crescimento e na produção, acúmulo de nitrato nos tecidos devido à menor atividade da nitrato redutase, e, em casos mais graves, necrose marginal. Em mudas, pode provocar sintomas semelhantes à deficiência de nitrogênio, mas com teores foliares elevados de NO_3^- .

Fitotoxicidade

A toxidez por molibdênio é extremamente rara em sistemas agrícolas, ocorrendo geralmente apenas em solos com aplicação excessiva ou contaminação industrial. Em níveis muito elevados, pode causar desequilíbrio na absorção de cobre (Cu) e outros metais, levando a antagonismos nutricionais.

Fontes de adubação

Molibdato de amônio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ e molibdato de sódio $(\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$, aplicados via solo. A aplicação foliar também é eficiente, especialmente em viveiros ou em situações de deficiência confirmada.

CLORO (Cl)

Função fisiológica

O cloreto (Cl^-) atua como cofator essencial no **fotossistema II**, participando da fotólise da água e auxiliando na estabilização do **complexo de evolução do oxigênio** (*Oxygen Evolving Complex* – OEC), etapa fundamental para a liberação de O_2 e elétrons no processo fotossintético. Também exerce papel importante na **osmorregulação celular**, especialmente nas células-guarda dos estômatos, onde acompanha o fluxo de potássio (K^+) para regular a abertura e o fechamento estomatal, contribuindo para o controle das trocas gasosas e da transpiração.

O Cl^- influencia ainda a atividade de **ATPases de membrana**, como a **V-ATPase** do tonoplasto, modulando o turgor celular, a eficiência no uso da água e a tolerância a estresses moderados, como déficit hídrico e salinidade. Embora seja requerido em quantidades relativamente maiores que outros micronutrientes (em concentrações próximas aos macronutrientes secundários), seu papel é específico e indispensável para a fisiologia e a homeostase iônica das plantas.

Sintomas de deficiência

A deficiência de Cl^- no cafeeiro manifesta-se por menor abertura estomática, redução do turgor foliar, menor tolerância à seca e decréscimo da eficiência fotossintética. Visualmente, pode ocorrer clorose difusa, bronzeamento foliar, murcha parcial e crescimento radicular reduzido.

Fitotoxicidade

O excesso de Cl^- , especialmente quando a concentração foliar excede aproximadamente **0,35–0,50% da matéria seca**, pode induzir

necroses marginais, murchamento e sintomas semelhantes ao estresse salino, incluindo desidratação foliar e redução do crescimento.

Fontes de adubação

A suplementação de cloro, normalmente, vem de “carona” com a suplementação de outros nutrientes. Cloreto de potássio (KCl), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de magnésio (MgCl_2). A aplicação deve considerar o balanço iônico do sistema e a condutividade elétrica (EC) do solo, a fim de evitar salinidade excessiva e toxicidade.



DINÂMICA DE NUTRIENTES NO PERFIL DO SOLO E A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

A eficiência com que os nutrientes são disponibilizados às raízes está diretamente relacionada à dinâmica físico-química do solo, que determina a mobilidade e a retenção dos elementos essenciais. Em um Latossolo típico de regiões cafeeiras tropicais, os horizontes superficiais concentram a maior parte da matéria orgânica e dos nutrientes minerais na forma disponível, enquanto os horizontes subsuperficiais constituem reservas minerais que podem suprir a planta de forma gradual por meio da exploração radicular profunda. Nesse contexto, processos como a mineralização da matéria orgânica, a adsorção a colóides, as trocas iônicas, a fixação em minerais primários (notadamente óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio) e as perdas por lixiviação controlam a disponibilidade de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e micronutrientes.

A textura do solo, definida pela proporção relativa de areia, silte e argila, exerce papel decisivo na disponibilidade e na dinâmica dos nutrientes. Em Latossolos de textura argilosa, a elevada área superficial específica e a predominância de microporos favorecem a adsorção de nutrientes, como o fósforo (P), que se liga fortemente a óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), reduzindo sua disponibilidade na solução do solo, mesmo quando o teor total é elevado. Em contrapartida, solos mais arenosos apresentam menor capacidade de adsorção, mas são mais suscetíveis a perdas por lixiviação de formas móveis, como o nitrato (NO_3^-) e o potássio (K^+), especialmente em condições de irrigação frequente ou precipitações intensas. Além disso, a porosidade, particularmente a relação entre macroporos e microporos, influencia diretamente a infiltração e o armazenamento de água, a aeração do perfil e a capacidade do sistema radicular de acessar reservas mais profundas de nutrientes.

A estrutura e a agregação do solo desempenham papel central na regulação da dinâmica de nutrientes. Agregados estáveis, especialmente de forma granular, conferem proteção à matéria orgânica contra decomposição acelerada, favorecem a liberação gradual de nutrientes, aumentam a disponibilidade hídrica para as raízes e reduzem a suscetibilidade à erosão. A estabilidade estrutural resulta não apenas da presença de matéria orgânica, mas também da intensa atividade biológica, incluindo o crescimento radicular, a ação de microrganismos e o entrelaçamento por hifas fúngicas, bem como da presença de cátions polivalentes, como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), que promovem a formação de pontes iônicas entre partículas. Em contraste, solos compactados ou com estrutura degradada apresentam redução da porosidade total e dos macroporos, drenagem deficiente, menor atividade biológica e menor capacidade de retenção e ciclagem de nutrientes, favorecendo perdas por escoamento superficial e comprometendo a sustentabilidade do sistema produtivo.

A textura argilosa, associada a uma elevada capacidade de troca catiônica (CTC) e ao teor de matéria orgânica, influencia não apenas a disponibilidade de macronutrientes, mas também a de micronutrientes essenciais como ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) e boro (B). Em Latossolos tropicais, a alta concentração de óxidos e hidróxidos de Fe e Al promove forte adsorção de fósforo (P) e de micronutrientes como Fe e Mn em condições de pH ácido, reduzindo sua solubilidade e disponibilidade, mesmo quando as reservas totais são elevadas. A matéria orgânica, por sua vez, contribui para o aumento da CTC orgânica e forma complexos estáveis com Zn e Cu, elevando sua disponibilidade e minimizando riscos de fitotoxicidade. Em sistemas cafeeiros, práticas como a manutenção de palhada natural ou o consórcio com gramíneas têm demonstrado potencial para aumentar a retenção e a mobilização de Fe e Mn nas camadas superficiais, favorecendo a nutrição da planta durante estádios fenológicos de alta demanda, como a fase reprodutiva.

O pH do solo é um dos principais reguladores da disponibilidade de nutrientes. Em Latossolos tropicais, que frequentemente apresentam pH inferior a 5,5, a solubilidade de ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn) aumenta significativamente, o que pode intensificar a fixação de fósforo (P) por Al e Fe e, no caso do Mn, provocar toxidez em condições severas.

Em contrapartida, micronutrientes como zinco (Zn), cobre (Cu) e boro (B) apresentam menor disponibilidade em pH ácido, enquanto o molibdênio (Mo), geralmente absorvido como molibdato (MoO_4^{2-}), também tem sua meia-vida e aproveitamento reduzidos. A correção da acidez do solo por meio da calagem eleva a disponibilidade de P e de diversos micronutrientes, além de criar um ambiente mais favorável ao desenvolvimento radicular e à atividade microbiana, otimizando a ciclagem de nutrientes.

A matéria orgânica (MO) é um componente essencial na retenção e ciclagem de nutrientes. Ela fornece sítios adicionais de troca catiônica, atua como reserva de nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S) e diversos micronutrientes que são liberados gradualmente por mineralização, além de melhorar a capacidade de retenção de água e a estabilidade estrutural do solo. Em sistemas cafeeiros integrados com culturas de cobertura, como a braquiária (*Urochloa decumbens*), observa-se aumento na retenção de nutrientes no perfil, elevação da atividade enzimática do solo (como urease e fosfatase), maior incorporação de MO e redução das perdas de N e P por lixiviação. A capacidade de troca catiônica (CTC) é naturalmente elevada em solos argilosos com teores adequados de MO, apresentando forte correlação com a fertilidade natural e a resiliência do sistema produtivo.

A capacidade de troca catiônica (CTC), resultante da interação entre a fração argilosa e a matéria orgânica (MO), define a quantidade de cátions, como cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+) e amônio (NH_4^+), que pode ser retida no complexo coloidal do solo, reduzindo perdas por lixiviação e contribuindo para a estabilidade do pH e da fertilidade. Solos com CTC elevada possuem maior reserva de nutrientes disponíveis para as plantas; entretanto, a aplicação excessiva de fertilizantes nitrogenados, especialmente nas formas amoniacais, pode promover acidificação do solo, elevar a concentração de alumínio tóxico (Al^{3+}) e, consequentemente, prejudicar a absorção radicular e a disponibilidade de fósforo (P).

O processo de mineralização e a ciclagem mediada por microrganismos convertem a matéria orgânica (MO) e os resíduos vegetais em formas minerais assimiláveis pelas plantas: nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) para o nitrogênio (N); fosfatos solúveis para o fósforo (P); além de micronutrientes previamente adsorvidos, que são liberados de forma

gradual. A intensidade dessa atividade microbiana está diretamente relacionada ao teor de MO, ao pH moderado, à adequada aeração e à disponibilidade de umidade, atributos que dependem da estrutura e da porosidade do solo. Em sistemas cafeeiros, práticas regenerativas que elevam o conteúdo de MO têm mostrado efeito positivo sobre a eficiência de uso de fertilizantes e sobre a sustentabilidade da nutrição mineral.

Esses parâmetros estão diretamente relacionados ao manejo de fertilizantes nitrogenados. Em sistemas irrigados ou submetidos a altas doses de adubação nitrogenada, a distribuição vertical do nitrato (NO_3^-) e da matéria orgânica, associada à percolação da água em períodos de elevada precipitação, torna a estrutura física e química do solo determinante para a mitigação de perdas.

Uma das primeiras dimensões a serem avaliadas é a dinâmica do nitrogênio (N) no perfil do solo. Em sistemas cafeeiros, pesquisas mostram que tanto o manejo do dossel quanto o tipo de adubo nitrogenado utilizado, orgânico, inorgânico ou combinações, influenciam de forma significativa a distribuição vertical de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), além de afetarem a biomassa microbiana responsável pela mineralização. Em sistemas agroflorestais de café na Indonésia, por exemplo, árvores submetidas à poda apresentaram aumento de 10% a 56% no N total do solo e na biomassa microbiana na camada de 0–20 cm, resultado do rápido retorno de resíduos vegetais ao solo e da intensificação da atividade biológica. Em contrapartida, áreas sem poda apresentaram maiores concentrações de NO_3^- e NH_4^+ em profundidades de 20–40 cm. Esses resultados reforçam a interação entre práticas de manejo físico, como a poda, e propriedades químicas do solo, como o teor de matéria orgânica total (MAT), a biomassa microbiana de N (NBM) e as formas minerais de N, na retenção e na ciclagem do nutriente.

Em paralelo, a dinâmica do fósforo (P) em Latossolos tropicais de textura argilosa é fortemente influenciada pela intensa adsorção do nutriente a óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) em condições de pH ácido, o que restringe sua disponibilidade, mesmo quando os teores totais no solo são elevados. Estudos recentes com fertilizantes de liberação controlada (CRFs) e misturas físicas de MAP (fosfato monoamônio) têm apresentado bons resultados na fase de estabelecimento do cafeeiro,

promovendo liberação gradual de P por até seis meses e resultando em aumentos consistentes de área foliar, biomassa e teores de P no solo, de forma proporcional à dose aplicada. Esses resultados ilustram como o perfil físico-químico do solo, a mineralogia da fração argilosa e o pH exercem papel determinante na eficiência da adubação fosfatada.

Além disso, a adubação foliar pode estimular a síntese de enzimas-chave, como fosfatases e redutases, favorecendo o aproveitamento de fósforo (P) e nitrogênio (N) diretamente pelas folhas, independentemente da disponibilidade no solo, aspecto particularmente relevante em condições de compactação ou elevada acidez. Recomenda-se, como prática de manejo, a realização de análises foliares antes do período de floração, a fim de obter um diagnóstico nutricional rápido e preciso. Com base nesses resultados, a aplicação foliar deve ser calibrada quanto à dose e ao pH da calda (mantido entre 5,0 e 6,0) para evitar fitotoxicidade e garantir adequada mobilidade no floema.

A capacidade de troca catiônica (CTC) funciona como um amortecedor natural das variações na disponibilidade de cátions essenciais, como potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e amônio (NH_4^+). Solos com maior teor de argila e matéria orgânica apresentam CTC mais elevada, o que contribui para estabilizar o pH, preservar os nutrientes no complexo coloidal e reduzir perdas por lixiviação, resultando em menor variação nos teores das formas disponíveis, fator particularmente importante em condições de alta pluviosidade ou irrigação frequente. No cultivo do café, práticas como a manutenção de cobertura viva com o plantio de gramíneas nas entrelinhas favorecem o acúmulo de matéria orgânica e o aumento da CTC, além de promoverem maior retenção de nutrientes e melhoria na estabilidade dos agregados do solo.

A estrutura física do solo, caracterizada pela distribuição e estabilidade dos agregados, influencia diretamente processos como infiltração e armazenamento de água, aeração, resistência à erosão e mobilidade de solutos. Agregados granulares estáveis reduzem a perda acelerada de matéria orgânica e nutrientes, contribuindo para uma matriz nutritiva mais equilibrada. Em Latossolos com plantio recente de café, práticas como a aplicação de gesso agrícola, o uso de coberturas vegetais e a adubação com fertilizantes organominerais têm mostrado potencial

para melhorar a estabilidade dos agregados e a organização do espaço poroso, favorecendo o crescimento radicular e a conservação de nutrientes ao longo do perfil.

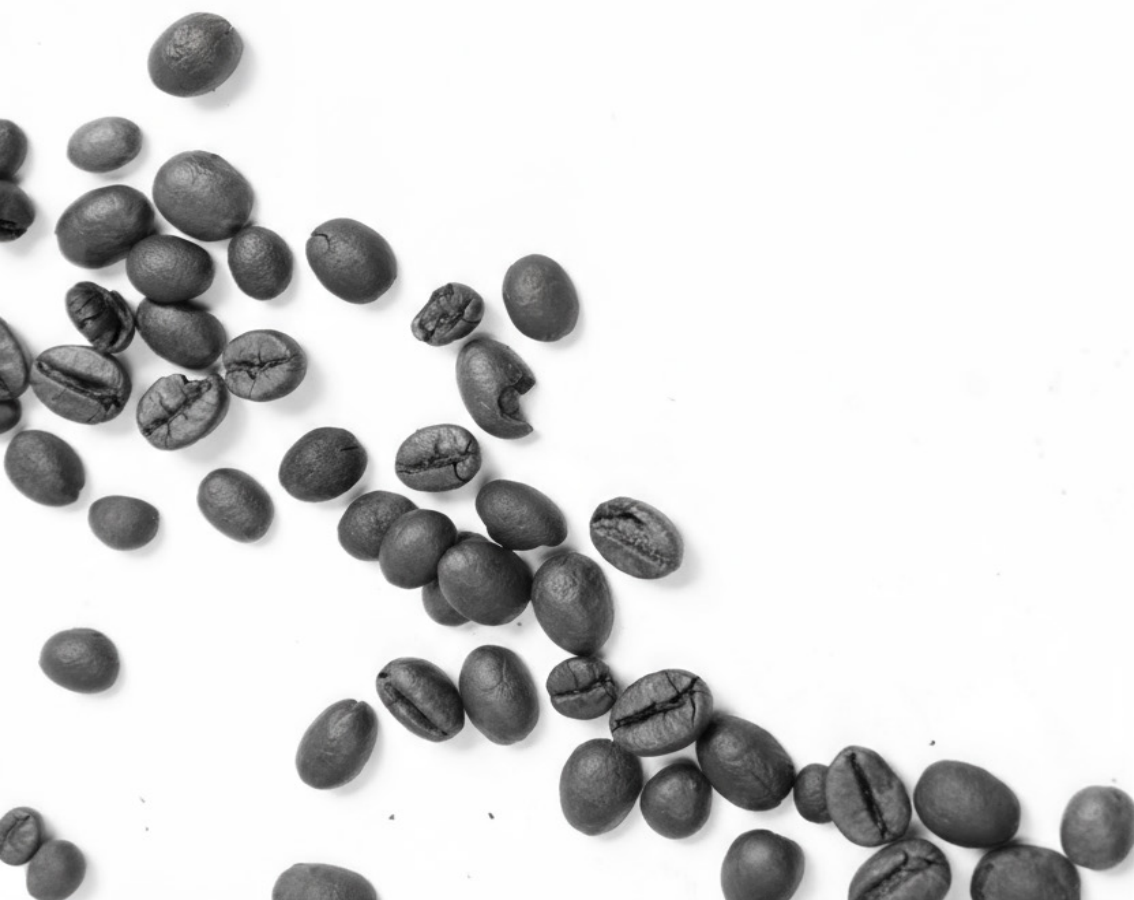
Outro aspecto fundamental é a porosidade do solo e sua densidade aparente, que determinam o equilíbrio entre macroporos, essenciais para a drenagem e a oxigenação, e microporos, responsáveis pela retenção de água disponível às plantas. Solos compactados apresentam alta densidade aparente, menor proporção de macroporos e, conseqüentemente, restrição ao crescimento radicular, o que dificulta a ciclagem e a absorção de nutrientes. Solos de textura argilosa tendem a apresentar maior volume de microporos, favorecendo a retenção hídrica, enquanto solos arenosos apresentam maior proporção de macroporos, promovendo drenagem rápida, mas aumentando o risco de lixiviação de formas móveis de nutrientes, como o nitrato (NO_3^-) e o potássio (K^+), especialmente quando a estrutura é deficiente.

A matéria orgânica (MO) atua como um reservatório de liberação lenta de nutrientes, incluindo nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S) e diversos micronutrientes. Além disso, contribui para o aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) e estimula a atividade da microflora do solo, bem como de enzimas como uréase e fosfatase, que participam ativamente dos ciclos biogeoquímicos. Em sistemas cafeeiros que apresentam incremento gradual de MO, seja pela manutenção de cobertura vegetal ou pelo uso de adubos verdes, observa-se maior retenção de minerais no perfil, redução das perdas por lixiviação e elevação da atividade biológica, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a estabilidade do sistema produtivo.

As propriedades químicas do solo, como o pH, a condutividade elétrica (CE) e a composição mineralógica da fração argilosa, exercem forte influência sobre a solubilidade, a adsorção e a fixação de nutrientes. Em condições de pH ácido, íons como alumínio (Al^{3+}) e ferro (Fe^{3+}) tornam-se predominantes na solução do solo e promovem a fixação de fósforo (P), reduzindo sua disponibilidade; o molibdênio (Mo), absorvido na forma de molibdato (MoO_4^{2-}), também apresenta disponibilidade reduzida nessas condições. A correção da acidez por meio da calagem eleva o pH, aumentando a disponibilidade de P e de vários micronutrientes, além de

estimular a atividade biológica e melhorar as condições para o crescimento radicular. Já valores elevados de CE podem indicar risco de salinidade, afetando a retenção de potássio (K) e a mobilidade iônica no solo.

Em síntese, a interação entre as propriedades físicas e químicas do solo é dinâmica e interdependente. A textura e a agregação influenciam a estrutura, a porosidade e a drenagem; a matéria orgânica contribui para o aumento da CTC, a melhoria da estrutura e a formação de reservas de nutrientes; o pH regula a solubilidade e a adsorção dos elementos; e a CTC determina a capacidade de retenção de cátions no complexo coloidal. Essa rede de interações condiciona a disponibilidade de nutrientes em cada horizonte do perfil e, consequentemente, a eficiência da nutrição mineral do cafeeiro.



MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO E DO ESTADO NUTRICIONAL DO CAFEIEIRO

Na cafeicultura, maximizar produtividade, qualidade e rentabilidade requer diagnósticos precisos tanto do solo quanto das plantas. Análises isoladas, apenas de solo ou apenas foliar, reduzem a eficácia das recomendações de adubação. Um solo pode apresentar teores adequados de nutrientes, mas, se houver restrições físicas, químicas ou fisiológicas que limitem a absorção pelas raízes, ocorre desperdício de insumos e risco de desequilíbrios nutricionais. De forma semelhante, concentrações adequadas de nutrientes nas folhas podem ocultar deficiências no solo ou indicar desbalanços nas relações entre elementos. Por isso, o diagnóstico integrado solo–folha se consolida como prática essencial na gestão nutricional do cafeeiro.

Em sistemas de café arábica em Latossolos tropicais, com acidez elevada e baixa matéria orgânica, a análise combinada do solo e do tecido vegetal permite interpretar de forma mais fiel o estado nutricional da lavoura. Esse enfoque é complementado por métodos de interpretação consagrados, faixas de suficiência e nível crítico e, quando se deseja maior sensibilidade a desequilíbrios entre elementos na planta, pelo uso do DRIS na análise foliar. Esse conjunto sustenta decisões mais assertivas de correção e adubação ao longo do ciclo produtivo.

MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DA FERTILIDADE DO SOLO

Amostragem e laboratório

A representatividade da análise começa na coleta. Em talhões homogêneos, recomenda-se compor a amostra com, no mínimo, vinte

subamostras por talhão, coletadas na camada de zero a vinte centímetros e, de forma periódica, também na camada de vinte a quarenta centímetros para avaliar possíveis limitações em subsuperfície. A coleta após a colheita é prática comum para planejar correção e adubação do novo ciclo. Nos laboratórios, as análises incluem pH, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, bases trocáveis (cálcio, magnésio e potássio), fósforo extraível e micronutrientes como zinco, cobre, ferro, manganês e boro.

Interpretação tradicional e faixas adequadas no solo

Os níveis críticos e as faixas de suficiência são definidos por consensos regionais e ensaios de calibração. Para o cafeeiro, os manuais e estudos regionais indicam pH do solo desejável próximo de 5,5 a 6,0, com saturação por bases ajustada em função da capacidade de troca a pH 7: em solos de capacidade baixa, metas de saturação mais altas (~80%) são necessárias para alcançar o pH adequado; em solos de capacidade média, metas intermediárias 60- 70%; e em solos de capacidade boa, metas por volta de 60% por cento tendem a ser suficientes.

Para teores de nutrientes do solo obtidos com extrator Mehlich-1, referências amplamente usadas em cafeicultura brasileira indicam, como guias práticos: fósforo disponível adequado quando acima de 20 mg dm⁻³; potássio com classe média entre 100 e 160 mg dm⁻³ e alto acima desse intervalo; cálcio entre 1,5 e 3,0 cmol de carga por dm⁻³ e magnésio entre 0,5 e 1,0 cmol de carga por dm⁻³; enxofre entre 5,0 e 10,0 mg dm⁻³; zinco entre 1,5 e 3, mg dm⁻³. Esses valores orientam o ajuste de calagem e adubação de manutenção, sempre considerando o histórico e as metas de produtividade.

DIAGNÓSTICO DO ESTADO NUTRICIONAL DO CAFEIEIRO

Coleta da amostra foliar

Amostram-se folhas completamente expandidas no terceiro ou quarto par na porção mediana da planta em período padronizado, lembrando que análise foliar pode ser realizada a qualquer momento, desde que se siga os padrões referenciais para cada época. Para lavouras em produção, recomenda-se coletar quatro folhas por planta em, pelo

menos, vinte e cinco plantas por talhão homogêneo, totalizando cerca de cem folhas por amostra composta. Evitam-se plantas com sintomas de pragas, doenças ou danos mecânicos, e a coleta não deve ocorrer logo após pulverizações.

Faixas de suficiência foliar

Os teores obtidos são comparados com faixas de suficiência estabelecidas regionalmente para folhas coletadas na época recomendada. Sínteses de trabalhos clássicos para arábica apontam, como intervalos de referência frequentes: nitrogênio entre 28,0 e 32,0 g kg⁻¹; fósforo entre 1,5 e 2,0 g kg⁻¹; potássio entre 16,0 e 31,0 g kg⁻¹; cálcio entre 10,0 e 19,0 g kg⁻¹; magnésio entre 3,5 e 5,0 g kg⁻¹; enxofre entre 1,5 e 2,0 g kg⁻¹. Para micronutrientes, boro entre cinquenta e oitenta miligramas por quilograma; zinco entre seis e vinte e quatro miligramas por quilograma; cobre entre dez e vinte miligramas por quilograma; ferro entre oitenta e um e cento e vinte e quatro miligramas por quilograma; manganês entre oitenta e nove e cento e oitenta e dois miligramas por quilograma.

Interpretação por faixas críticas e pelo DRIS

As faixas críticas relacionam teor foliar e produtividade e são diretas e operacionais. Já o DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação) interpreta o equilíbrio entre nutrientes na folha, gerando índices para cada elemento: valores mais negativos sugerem maior probabilidade de limitação relativa, enquanto positivos podem refletir excesso relativo no balanço. Em cafeeiro, o DRIS tem mostrado boa capacidade de discriminar lavouras quanto à ordem de limitação nutricional e orientar ajustes finos na adubação, sobretudo quando há desequilíbrios entre elementos.

Vantagens práticas do DRIS na folha

- permite ranquear a ordem de limitação nutricional, priorizando intervenções.
- reduz o risco de adubações excessivas ou insuficientes ao considerar relações entre elementos, não apenas valores absolutos.

- complementa as faixas críticas quando a lavoura apresenta múltiplos desequilíbrios nutricionais.

Correlação solo–folha e diagnóstico integrado

Comparar simultaneamente os resultados do solo e das folhas ajuda a distinguir restrições de disponibilidade no solo de problemas de absorção. Por exemplo, fósforo adequado no solo, mas baixo nas folhas, pode indicar fixação por óxidos de ferro e alumínio ou limitações do sistema radicular; já potássio elevado no solo sem resposta foliar pode sinalizar desequilíbrio com cálcio e magnésio. Estudos relacionando atributos do solo e a análise foliar em arábica reforçam a utilidade desse cruzamento para interpretar respostas de produtividade.

Diretrizes práticas e fluxo operacional recomendado

1. Após a colheita: realizar amostragem de solo nas camadas de 0-20 centímetros e, periodicamente, de 20-40 centímetros. Solicitar análise completa e interpretar pH, saturação por bases, fósforo disponível por Mehlich-1, potássio trocável, cálcio, magnésio e micronutrientes.
2. Antes da florada: coletar folhas recém-maduras conforme o protocolo indicado e interpretar pelos intervalos de suficiência; quando desejado maior sensibilidade a desequilíbrios, calcular índices DRIS.
3. Integração solo–folha: cruzar resultados para priorizar correções e adubações de manutenção, distinguindo falta de disponibilidade no solo de limitações de absorção.
4. Aplicações: privilegiar a adubação via solo para macronutrientes e considerar suplementações foliares para micronutrientes críticos, como zinco ou boro, quando indicado pela diagnose.
5. Monitoramento: repetir a análise de solo e foliar em janelas consistentes do ciclo, mantendo histórico por talhão para detectar tendências e ajustar o manejo a cada safra.

PRÁTICAS DE CALAGEM E GESSAGEM NA CAFEICULTURA: EFEITOS E RECOMENDAÇÕES

O manejo da acidez do solo é um fator crítico na cafeicultura, especialmente nas regiões tropicais com solos naturalmente ácidos, como os Latossolos amplamente presentes no Brasil. A calagem e a gessagem constituem práticas essenciais para manter altos tetos produtivos, restaurar o equilíbrio químico e ampliar a exploração radicular.

A calagem, realizada com calcário calcítico (carbonato de cálcio) ou dolomítico (carbonatos de cálcio e magnésio), tem como principais funções a correção do pH do solo e a neutralização do alumínio tóxico (Al^{3+}), além de fornecer cálcio (Ca) e magnésio (Mg) como nutrientes essenciais.

O gesso agrícola ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), por sua vez, não altera o pH do solo de forma significativa, mas atua na melhoria do ambiente radicular em camadas subsuperficiais. Seu efeito principal ocorre pela redução da toxidez de alumínio em profundidade, aumento da disponibilidade de cálcio e fornecimento de enxofre (S) para o sistema radicular.

Essas práticas influenciam não apenas a nutrição mineral das plantas (com destaque para Ca, Mg, S e P), mas também promovem benefícios físicos, como a melhoria da estrutura e da porosidade do solo, e biológicos, como o estímulo à atividade microbiana e à agregação de partículas.

Este capítulo aprofundará os mecanismos de ação, os efeitos na cafeicultura, as recomendações de aplicação e as normas para um manejo seguro e eficaz dessas práticas.

CÁLCULO DA NECESSIDADE DE CALAGEM E RECOMENDAÇÃO DE APLICAÇÃO NA CAFEICULTURA

A determinação da necessidade de calagem (NC) constitui uma etapa essencial no manejo químico do solo para a cafeicultura, uma vez que a aplicação correta do corretivo é determinante para neutralizar a acidez, reduzir a toxidez por alumínio e garantir a disponibilidade de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) em níveis adequados. Em solos tropicais fortemente intemperizados, como os Latossolos e Argissolos, a acidez está frequentemente associada a elevados teores de Al^{3+} trocável e baixa saturação por bases, o que limita o crescimento radicular, restringe a absorção de água e nutrientes e compromete o potencial produtivo do cafeeiro.

A função primária da calagem é a neutralização dos íons H^+ e Al^{3+} da solução e do complexo sortivo do solo, elevando o pH para valores que minimizam a solubilidade tóxica do alumínio e promovem maior disponibilidade de nutrientes, especialmente fósforo (P) e molibdênio (Mo). Simultaneamente, o calcário fornece Ca^{2+} e Mg^{2+} , elementos indispensáveis para a estabilidade da parede celular, funcionamento enzimático e equilíbrio catiônico na rizosfera. Esses efeitos químicos também se refletem em melhorias físicas, como aumento da agregação e da porosidade do solo, e biológicas, com incremento da atividade microbiana responsável por processos-chave no ciclo de nutrientes.

A estimativa da NC deve ser baseada em métodos reconhecidos que permitam não apenas elevar o pH e a saturação por bases, mas também suprir quantitativamente as necessidades de Ca^{2+} e Mg^{2+} para o desenvolvimento do cafeeiro. Dois métodos são amplamente empregados:

1. Método da neutralização do alumínio trocável e suprimento de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

Este método é especialmente indicado para solos de baixa capacidade de troca catiônica (CTC), nos quais a fixação de cátions básicos pode comprometer a nutrição mineral. A fórmula é:

$$\text{NC (t/ha)} = Y \times \text{Al}^{3+} + [X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]$$

onde Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} correspondem aos teores trocáveis (cmolc/dm^3); X é o requisito de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ para a cultura ($3,5 \text{ cmolc/dm}^3$)

para café); e **Y** é um coeficiente que expressa a capacidade tampão do solo, estimado com base na textura ou no fósforo remanescente (P-rem), indicador sensível da reatividade dos colóides e da capacidade de adsorção de ânions.

2. Método da saturação por bases (V%)

Mais difundido em sistemas agrícolas tropicais, baseia-se no aumento da V% do solo até um valor pré-estabelecido para a cultura, geralmente de 60% para o cafeeiro, embora valores entre 60% e 70% possam ser adotados em função da CTC e da textura do solo. A fórmula é:

$$NC \text{ (t/ha)} = \frac{T \times (V_e - V_a)}{100}$$

onde **T** é a CTC a pH 7 (cmolc/dm³), **Ve** é a saturação por bases esperada e **Va** é a saturação por bases atual.

Após a obtenção da NC, considera-se que o cálculo foi feito para um corretivo com PRNT = 100%, incorporado na camada de 0–20 cm. Para ajustar à realidade de campo, é necessário calcular a quantidade prática de calcário (QC), de acordo com as condições de aplicação e a qualidade do produto:

$$QC \text{ (t/ha)} = NC \times \frac{SC}{100} \times \frac{PF}{20} \times \frac{100}{PRNT}$$

em que SC representa a porcentagem da superfície efetivamente corrigida (100% para área total, <100% para aplicação em faixa), PF é a profundidade de incorporação (cm) e **PRNT** é o Poder Relativo de Neutralização Total do corretivo. Em casos de aplicação em covas (40 × 40 × 40 cm), utiliza-se:

$$QC \text{ (g/cova)} = NC \text{ (t/ha)} \times 32 \times \frac{100}{PRNT}$$

A recomendação técnica preconiza calcular a NC pelos dois métodos, adotar o menor valor e verificar se ele atende à exigência mínima de Ca²⁺ + Mg²⁺. Caso não atenda, utiliza-se o valor obtido pelo método da neutralização do alumínio. Se o valor final ultrapassar a CTC a pH 7, este deve ser utilizado como limite máximo, prevenindo a supercalagem e os

riscos associados, como deficiência induzida de micronutrientes (Zn, Mn, Fe e B) e redução da disponibilidade de potássio (K^+).

EXEMPLO NUMÉRICO APLICADO À CAFEICULTURA

Parâmetros obtidos por análise de solo:

- $Al^{3+} = 1,5 \text{ cmolc/dm}^3$
- $Ca^{2+} = 1,0 \text{ cmolc/dm}^3$
- $Mg^{2+} = 0,5 \text{ cmolc/dm}^3$
- $T = 6,0 \text{ cmolc/dm}^3$
- $V_a = 30\%$
- $X = 3,5 \text{ cmolc/dm}^3$
- $Y = 2$ (solo de textura média)
- $SC = 100\%$ (área total)
- $PF = 20 \text{ cm}$ (incorporação padrão)
- $PRNT = 80\%$

Método da saturação por bases:

$$NC_1 = \frac{6,0 \times (60 - 30)}{100} = 1,8 \text{ t/ha}$$

Método da neutralização do alumínio:

$$NC_2 = 2 \times 1,5 + (3,5 - (1,0 + 0,5)) = 3,0 + 2,0 = 5,0 \text{ t/ha}$$

A menor dose (1,8 t/ha) não supre a exigência mínima de Ca^{2+} + Mg^{2+} , razão pela qual se adota a dose de 5,0 t/ha do método da neutralização do alumínio. Como este valor é inferior à CTC (6,0 cmolc/dm³), é seguro para aplicação.

Quantidade prática de calcário (QC):

$$QC = 5,0 \times \frac{100}{100} \times \frac{20}{20} \times \frac{100}{80} = 6,25 \text{ t/ha}$$

Conclusão: aplicar **6,25 t/ha** de calcário com PRNT de 80%, incorporado uniformemente na camada de 0–20 cm.

GESSAGEM NA CAFEICULTURA: FUNDAMENTOS TEÓRICOS E CÁLCULO APLICADO

A gessagem consiste na aplicação de gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na camada subsuperficial do solo (geralmente 20–40 cm) com o objetivo de fornecer cálcio (Ca^{2+}) e enxofre (S), além de melhorar o ambiente químico e físico da rizosfera em profundidade. Ao contrário da calagem, o gesso não corrige o pH, mas promove a mobilização de Ca^{2+} pelo perfil e reduz a toxidez de alumínio, fatores críticos para o desenvolvimento radicular e a eficiência no uso da água e nutrientes. Devido à sua alta solubilidade, o gesso atua rapidamente, especialmente em solos tropicais tropicamente intemperizados, como os Latossolos do Brasil.

CrITÉRIOS para Indicação da Gessagem

É recomendada a aplicação de gesso quando, na camada de 20–40 cm, uma ou mais das seguintes condições estiverem presentes:

- Saturação por bases (V%) inferior a 35%;
- Teor de cálcio (Ca^{2+}) menor que $0,5 \text{ cmolc/dm}^3$;
- Teor de alumínio (Al^{3+}) maior que $0,5 \text{ cmolc/dm}^3$;
- Saturação por alumínio (m%) elevada — com referências mencionando valores $\geq 20\%$ ou $\geq 30\%$ como limites críticos.

Métodos de Cálculo de Gessagem

1. A partir da Saturação por Bases (V%) e CTC

$$\text{NG (kg/ha)} = \frac{(V_e - V_a) \times \text{CTC}}{500}$$

Onde:

- V_e : saturação por bases esperada (%);
- V_a : saturação por bases atual na camada subsuperficial (%);
- CTC: capacidade de troca catiônica da mesma camada (cmolc/dm^3).

2. A partir da Necessidade de Calagem (NC)

Neste método, primeiro estima-se a NC para a camada de interesse (ex: 20–40 cm), e então:

$$NG \text{ (t/ha)} = 0,30 \times NC$$

Depois, converte-se em quantidade prática para aplicação (QG):

$$QG \text{ (t/ha)} = NG \times \frac{SC}{100} \times \frac{PF}{20}$$

Onde:

- SC: porcentagem da área a ser coberta (100% para área total; 75% em faixas);
- PF: espessura da camada corrigida (em cm — usualmente 20 cm para camada 20–40 cm).

3. Com base no teor de argila

Para culturas perenes (como o cafeeiro):

$$NG = 75 \times \text{Teor de Argila (\%)}$$

Este método, embora simplista, é utilizado na ausência de dados químicos detalhados.

NOVA METODOLOGIA DE CÁLCULO DE GESSAGEM — BASEADA NA SATURAÇÃO POR CÁLCIO (CAIRES & GUIMARÃES, 2018)

Recentemente, uma abordagem inovadora foi proposta com base na análise empírica de experimentos de campo envolvendo culturas como milho, soja, trigo e cevada, realizadas em Latossolos sob plantio direto na região Sul do Brasil. Os autores Caires e Guimarães utilizaram técnicas de mineração de dados de experimentos de campo com aplicação de diferentes doses de gesso para propor uma nova metodologia de cálculo de gessagem. Os estudos identificaram que as melhores produtividades foram obtidas quando a saturação de cálcio na CTC efetiva da camada de 20–40 cm atingia aproximadamente 60%.

Com base nessa constatação, os autores desenvolveram uma fórmula que calcula a necessidade de gessagem em função da diferença entre a saturação de cálcio desejada (60 %) e a existente.

$$NG=(0,6 \times CTC_{ef}\text{-teor de Ca}) \times 6,4$$

Onde:

- **CTC_{ef}** é a Capacidade de Troca Catiônica efetiva;
- **Ca²⁺** é o teor de cálcio trocável na camada de 20–40 cm em cmolc dm⁻³;

Considerações Técnicas Adicionais

A escolha do método de gessagem deve ser baseada na disponibilidade de indicadores químicos, profundidade de influência da prática e condições operacionais.

A combinação das abordagens (V%, NC ou textura) pode fornecer referência convergentes, contribuindo para uma recomendação mais robusta.

O uso excessivo de gesso pode causar lixiviação de magnésio (Mg²⁺) e potássio (K⁺), gerando desequilíbrios nutricionais. Desta forma, a condicionalidade da aplicação é crucial



MANEJO DA MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO NO SOLO DE CAFEICULTURA

A matéria orgânica do solo (MOS) é o eixo da fertilidade e da resiliência física e biológica dos cafezais do Brasil. Em Latossolos e Argissolos típicos das regiões cafeeiras, a MOS melhora a agregação, eleva a capacidade de retenção de água, estabiliza a temperatura e amplia a capacidade de troca catiônica, efeitos que se traduzem em maior eficiência do uso de nutrientes e menor vulnerabilidade a veranicos. Em termos práticos, dois caminhos estratégicos elevam estoques e funcionalidade da MOS na cafeicultura: i) insumos orgânicos aplicados em área total (sobretudo compostos de origem agrícola) e ii) manejo de plantas de cobertura na linha e entrelinhas; complementa-se com iii) o uso criterioso de fertilizantes organominerais, que integram fontes orgânicas e minerais para modular disponibilidade e perda de nutrientes, principalmente P e N. Essas práticas devem ser decididas com base em análise de solo e folha, alvo de produtividade e histórico de manejo, sempre ajustadas à variabilidade do terreno.

No manejo com compostos orgânicos de aplicação em área total, prioriza-se material estável (composto maturado) com relação C:N intermediária, baixo teor de impurezas e boa higienização. Em cafezais adultos, a distribuição superficial após a colheita aproveita o período de chuvas subsequente para incorporação gradual, alimentando a biomassa microbiana e reduzindo picos de mineralização fora de fase. Em áreas com suscetibilidade à erosão, a aplicação deve acompanhar a curva de nível, e a taxa ajusta-se à meta de aporte de carbono ($\text{kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e à necessidade de correção de bases, evitando sobreposições com calagem e gessagem. Onde houver disponibilidade, compostos derivados de resíduos do próprio sistema (palhada do café, restos de poda, casca/despolpa compostadas) fecham ciclos, elevam MOS lábil e alimentam frações

mais estáveis a médio prazo. Em termos operacionais, a manutenção de cobertura superficial contínua sobre a faixa de projeção de copa (“debaixo da saia”) melhora a distribuição de raízes finas ativas e reduz respingos de solo nos frutos.

As plantas de cobertura na linha e entrelinhas, com destaque para braquiárias, têm papel central na construção de MOS e na estrutura física. Cortes periódicos com direcionamento da biomassa para a linha do cafeeiro funcionam como “esteira” de carbono e nutrientes, favorecendo a formação de bioporos, agregados mais estáveis e infiltração de água. Ensaio em Minas Gerais mostram que o consórcio braquiária nas entrelinhas, manejada a corte e com o material lançado para a linha, diminui a suscetibilidade à desagregação e melhora a distribuição de poros; quando essa cobertura é combinada a gessagem superficial, há maior exploração radicular em profundidade e melhor acesso à água no perfil, efeito crítico em anos secos. O ajuste fino consiste em escolher espécies e densidades que não compitam excessivamente por água no inverno e sincronizar os cortes com a fenologia do cafeeiro para maximizar a coincidência entre liberação de N e fases de demanda.

A sincronização do nitrogênio (N) com a fenologia do cafeeiro é decisiva para transformar MOS e adubação em produtividade. Em sequeiro, um esquema prático e robusto para lavouras adultas, calibrado pela análise de solo e folha e pela meta de produção, é fracionar o N em 3 a 5 aplicações alinhadas às fases fisiológicas: (1) pós-colheita/início das chuvas, priorizando recomposição de reservas e brotação; (2) pós-florada, para suportar pegamento; (3) expansão de frutos (primavera-verão), fase de maior dreno; e, quando necessário, (4) complemento em enchimento, observando risco de “lavagem” sob chuvas intensas. Em áreas irrigadas, o parcelamento pode ser ainda mais fino via fertirrigação. Em todos os casos, a cobertura viva e a manta orgânica reduzem volatilização e lixiviação, melhoram a sincronia solo-planta e permitem, muitas vezes, reduzir a dose total sem perda de desempenho. O balanceamento N:K na cobertura, ajustado à expectativa de safra, é particularmente importante para evitar desordens fisiológicas e queda de folhas.

O fósforo (P) merece atenção especial nos solos altamente intemperizados da cafeicultura brasileira. A forte interação P-óxidos de

Fe/Al e a estratificação superficial sob manejo conservacionista exigem estratégia combinada: correção de P com fontes solúveis localizadas na faixa de raízes ativas; manutenção de MOS e cobertura para aumentar complexação orgânica e reduzir fixação; e uso de organominerais quando disponíveis, pois a matriz orgânica atua como “tampão” que libera P gradualmente, cria microzonas de maior atividade microbiana e pode estabilizar a disponibilidade no 0–10 cm.

Em sistemas em plantio direto ou com mínima mobilização, é comum observar gradiente superficial de P; por isso, a amostragem deve estratificar camadas (0–5; 5–10; 10–20 cm) na linha e na entrelinha para não superestimar ou subestimar o nutriente. Na prática, ao implantar áreas novas, a combinação “fósforo no sulco/faixa + matéria orgânica + proteção superficial” tende a ser mais eficiente que aplicações exclusivamente a lanço.

A sinergia entre gesso agrícola e cobertura viva merece lugar no planejamento de médio prazo. O gesso, ao fornecer Ca e S e favorecer a movimentação de Ca^{2+} em profundidade, melhora o ambiente químico do subsolo e, associado ao aporte constante de raízes e resíduos das coberturas, promove agregação estável, mais macroporos em camadas abaixo de 20–40 cm e um sistema radicular mais profundo e distribuído. Ensaios de campo em Latossolos mostraram justamente esse efeito: doses elevadas de gesso aplicadas em superfície, combinadas ao manejo de braquiária entrelinhas, aumentaram a estabilidade de agregados e a exploração radicular, conectando o benefício químico (Ca/S em profundidade, menor atividade de Al^{3+}) com o benefício físico (bioporos e porosidade funcional). Em termos práticos, a gessagem deve seguir recomendação técnica (perfil, teor de argila, V% e necessidade de Ca/S) e ser acompanhada de cobertura ativa; sem biomassa e raízes, parte do ganho estrutural se perde.

A variabilidade espacial dentro do talhão é regra, não exceção, em cafezais de relevo ondulado e solos com variação de argila e posição na encosta. Incorporar princípios de agricultura de precisão melhora o retorno das práticas de MOS e fertilização. Um protocolo eficiente é: (i) usar relevo/condutividade aparente e mapas de produção ou vigor para definir 2–4 zonas de manejo; (ii) amostrar solo por zona e por posição (linha vs. entrelinha) em camadas rasas e subsuperficiais; (iii) ajustar doses

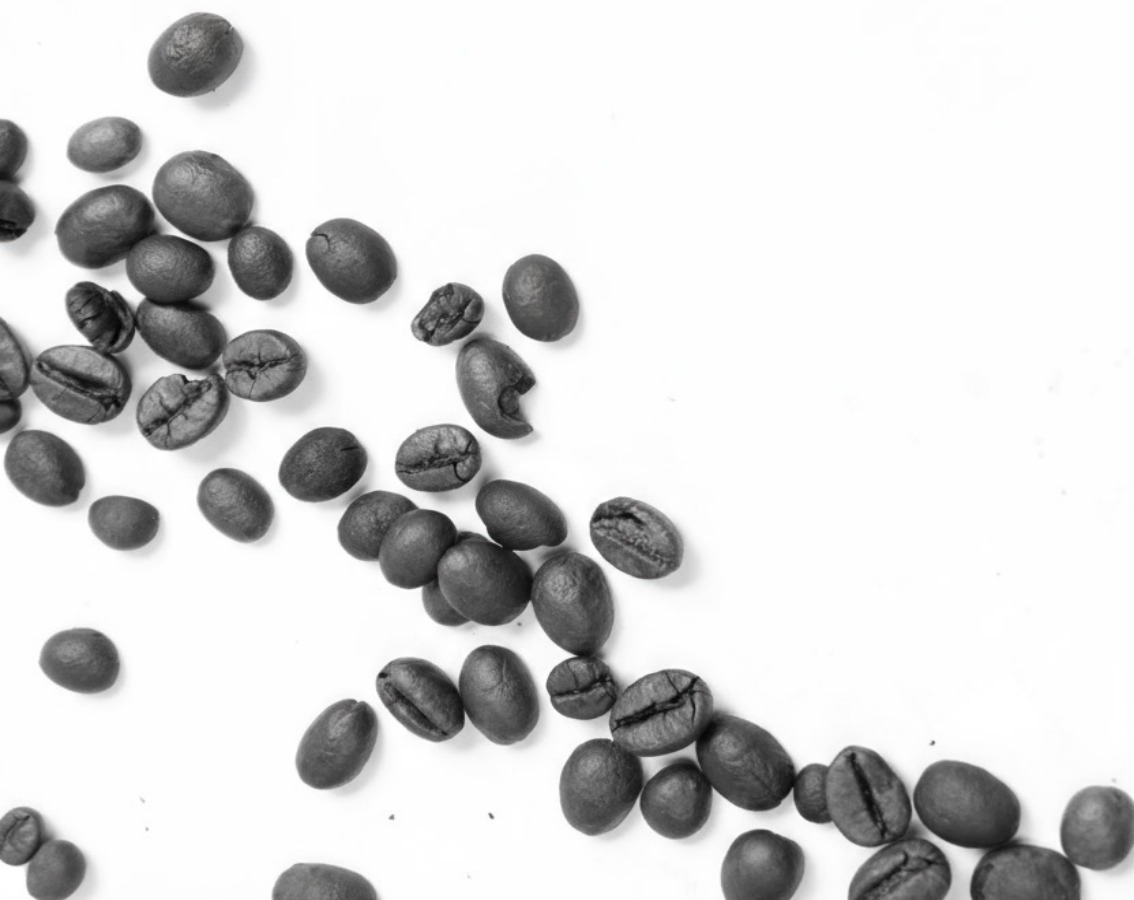
e formas, por exemplo, mais composto orgânico e K em topos e ombros rasos, foco em P localizado nas faixas com maior argila e maior fixação, e escalonar gesso onde o subsolo é mais limitante; (iv) quando disponível, operar equipamentos com taxa variável para NPK e corretivos. Em lavouras com controle de distribuição na faixa de copa, a localização do adubo “debaixo da saia” melhora a eficiência por coincidir com a maior densidade de raízes finas ativas, reduzindo perdas.

Os fertilizantes organominerais vêm ganhando espaço como ferramenta para alinhar aporte de C, liberação gradual de nutrientes e eficiência operacional. Em café arábica, resultados de campo indicam que organominerais formulados para atender a mesma dose de P_2O_5 da recomendação mineral podem manter ou superar a produtividade, com benefícios adicionais na disponibilidade de P e K no solo quando as aplicações são parceladas. Em termos de manejo, organominerais funcionam particularmente bem quando combinados a cobertura viva e manta orgânica na linha, pois a matriz orgânica do produto somada ao aporte de resíduos reduz pulsos de salinidade e melhora a sincronia oferta-demanda. A recomendação prática é: usar organomineral como parte (ou totalidade) da adubação de manutenção, manter o parcelamento alinhado à fenologia e checar o custo por unidade de nutriente entregue, além da logística de aplicação em faixa.

Quantificar e acompanhar os ganhos é parte do sucesso. Para a MOS e o carbono orgânico do solo (COS), recomenda-se amostragem periódica em camadas 0–10, 10–20 e 20–40 cm na linha e entrelinha; sempre que possível, incluir carbono particulado e indicadores biológicos (biomassa microbiana, atividade enzimática). Para o P, estratificar as camadas superficiais (0–5 e 5–10 cm) ajuda a interpretar o efeito do manejo conservacionista. Indicadores físicos (estabilidade de agregados, densidade do solo e infiltração) revelam as respostas estruturais às práticas de cobertura e gesso. No nível operacional, registre cortes das coberturas, datas e doses de composto/organomineral/gesso e vincule a mapas de produção: isso permite ajustar rapidamente zonas de manejo e comprovar resultados.

Sob a ótica da cafeicultura regenerativa, o manejo da MOS e as práticas supracitadas são o coração do sistema. A lógica é clara: coberturas

vivas permanentes e diversidade botânica mantêm o fluxo de carbono para o solo; compostos orgânicos fecham ciclos e elevam estoques estáveis; organominerais modulam a disponibilidade de nutrientes, sobretudo N e K, sem picos de perda; e a gessagem, quando indicada, “abre” o subsolo para raízes e água, diminuindo a dependência de insumos e risco climático. Em propriedades brasileiras que alinham essas frentes, cobertura vigorosa nas entrelinhas, cortes direcionados, composto da própria fazenda, adubação (inclusive organomineral) fracionada e localizada “debaixo da saia”, gesso conforme diagnóstico de perfil e decisões por zona, observam-se lavouras mais estáveis em safras difíceis, melhor eficiência do uso de fertilizantes e avanços tangíveis em indicadores de saúde do solo. Em suma: regenerar, no café, é gerir o ciclo do carbono no chão da lavoura, com ciência, constância e boa agronomia.



NUTRIÇÃO MINERAL E SEUS EFEITOS NA QUALIDADE DO CAFÉ

A nutrição mineral do cafeeiro influencia de maneira decisiva a qualidade física, química e sensorial dos grãos, porque governa a formação, o acúmulo e a preservação de precursores de aroma, acidez e doçura (açúcares, ácidos clorogênicos, compostos voláteis e fenóis) além de afetar a integridade de membranas durante o beneficiamento e a torra. A evidência acumulada aponta que a qualidade raramente é explicada por um nutriente isolado: ela emerge do equilíbrio entre elementos, do estado químico do solo (acidez, cargas, saturação por bases) e do ajuste fino de fontes e parcelamentos ao longo do ciclo. Em termos práticos, lavouras que conciliam suprimento adequado com proporções equilibradas entre macronutrientes e boa construção de matéria orgânica tendem a produzir grãos mais uniformes e xícaras mais limpas, doces e consistentes.

O nitrogênio permanece central pela sua função na fotossíntese, síntese proteica e crescimento vegetativo, mas o manejo deve evitar tanto a deficiência quanto o excesso. Doses elevadas e mal sincronizadas empurram a planta para gasto vegetativo, diluem açúcares e podem penalizar corpo e doçura do café; por outro lado, níveis adequados e bem parcelados (especialmente sob fertirrigação) favorecem taxa fotossintética, formação de precursores aromáticos e maturação mais uniforme. Na interface N-K, estudos de adubação em café mostram que proporções equilibradas entre esses dois nutrientes estão associadas a melhores notas sensoriais e a uma composição química do grão mais favorável; tanto o desequilíbrio por N quanto por K pode aumentar condutividade elétrica e lixiviação de potássio dos grãos, sinais de fragilidade de membrana que costumam correlacionar com perda de qualidade.

O potássio, por sua vez, é determinante para a translocação de açúcares, turgescência e enchimento de frutos. Sua deficiência reduz o

percentual de peneiras altas e aumenta defeitos físicos. Contudo, K em excesso provoca antagonismo com magnésio e cálcio, com reflexos na qualidade. Balancear K:Mg é especialmente relevante em solos tropicais nos quais o manejo privilegia o aumento do K intercambiável. Além da dose, a fonte de K pode introduzir nuances sensoriais: ensaios com KCl, K_2SO_4 e KNO_3 mostram que todas as fontes podem sustentar produtividade e, em muitos cenários, cafés de alta pontuação; em algumas condições, entretanto, o sulfato de potássio se associa a maior doçura e menor amargor, ao passo que o cloreto de potássio, quando dominante e mal manejado, pode favorecer atributos menos desejáveis. Não existe “fonte vencedora” universal, o KCl frequentemente oferece melhor custo-benefício, mas, quando a meta é maximizar atributos sensoriais finos, reduzir o aporte de cloreto, combinar fontes e empregar fracionamentos tende a ser uma escolha prudente. A própria presença de Cl^- no sistema exige atenção: acúmulos podem interferir em enzimas ligadas ao escurecimento e na estabilidade de membranas; o ajuste de enxofre e o uso de K_2SO_4 em parte do programa frequentemente mitigam esses efeitos.

Cálcio e magnésio sustentam paredes e membranas celulares, sinalização e, no caso do Mg, a própria clorofila. A boa saturação por Ca e Mg inibe toxicidade por Al^{3+} , melhora a estrutura do solo e favorece a retenção/fornecimento de água, criando um ambiente físico-químico que preserva o desenvolvimento do grão e a integridade do tecido durante a secagem. Em muitas regiões cafeeiras brasileiras, a calagem correta (guiada por análise de solo e metas realistas de saturação por bases) é um passo essencial para o conjunto da qualidade, porque eleva Ca e Mg, modera a acidez e ainda reduz a fixação de P.

É justamente no fósforo que o carbono orgânico total (COT) desempenha um papel estratégico. Em Latossolos e Argissolos altamente intemperizados, ricos em óxidos de Fe e Al, o P aplicado tende a ser rapidamente adsorvido, tornando-se menos disponível às raízes. O aumento do COT atua em três frentes: (i) substâncias húmicas e ácidos orgânicos competem com o fosfato por sítios de adsorção e complexam Al e Fe, bloqueando pontos ativos de fixação; (ii) ambientes com maior COT geralmente exibem maior fósforo remanescente (P-rem), indicador consagrado de menor propensão do solo a reter P; e (iii) maior atividade

microbiana eleva a ação de fosfatases e a mineralização do P orgânico. Na prática, isso se traduz em melhor eficiência de uso do P aplicado e, portanto, em maior probabilidade de o cafeeiro manter reservas de precursores de aroma e acidez equilibrada. Estratégias como adição de resíduos (incluindo casca de café e compostos), uso de fertilizantes organominerais, plantas de cobertura e manejo conservacionista aumentam o COT ao mesmo tempo em que constroem estabilidade física, o que contribui para maturação mais uniforme e consistência de safra.

O manejo da adubação fosfatada em solos tropicais, portanto, deve integrar três pilares: correção da acidez (calagem), construção de matéria orgânica (COT) e posicionamento/parcelamento da fonte. A aplicação localizada em faixas, o uso de fontes com solubilidade compatível com a reatividade do solo e o fracionamento em sistemas irrigados ou de maior crescimento vegetativo reduzem perdas e melhoram a sincronia solo-planta. A avaliação de P-rem no monitoramento de talhões é uma ferramenta prática para ajustar tanto a dose quanto a estratégia de fonte, uma vez que informa quão fortemente aquele solo tende a reter o P.

Entre os micronutrientes, destacam-se boro, zinco, manganês, ferro e cobre. O boro, comum de faltar em solos tropicais arenosos ou com baixo teor de matéria orgânica, está ligado à floração, pegamento e uniformidade da frutificação; sua deficiência leva a má formação e chochamento, com reflexos diretos em peneira e, indiretamente, em qualidade. Zinco e manganês participam de rotas enzimáticas chaves e do sistema antioxidante; zinco, por exemplo, relaciona-se à síntese de auxinas que modulam crescimento e enchimento de frutos, enquanto cobre tem papel estrutural em enzimas oxidases e na sanidade, com impactos indiretos na preservação de precursores aromáticos. O ponto crítico é manter faixas adequadas com o mínimo de antagonismos e sem extrapolar para toxicidades, o que reforça a necessidade de diagnóstico foliar periódico para ajustar micronutrientes com precisão.

O pano de fundo edáfico e o manejo da cobertura também modulam a expressão sensorial. Solos com melhor estrutura, maior porosidade e maior aporte de resíduos estabilizam umidade e temperatura, amortecem estresses e costumam sustentar perfis sensoriais mais previsíveis. Sistemas com sombreamento bem desenhado, espécie adequada, densidade e

arquitetura compatíveis, podem elevar a entrada de resíduos, aumentar o COT e moderar extremos térmicos, sem necessariamente reduzir qualidade; a resposta, porém, é dependente do ambiente e do material genético, e o objetivo final (qualidade, produtividade, colheita mecanizável) deve guiar a decisão. Em lavouras de alta insolação e baixo aporte de resíduos, cuidar do pH, da matéria orgânica e do equilíbrio K–Mg–Ca é particularmente relevante para não penalizar atributos de xícara.

Como diretriz prática integradora, programas nutricionais voltados a cafês finos devem: (1) começar por diagnóstico por talhão, combinando solo (com P-rem quando apropriado) e folha; (2) perseguir equilíbrio entre N e K, evitando extremos que elevem lixiviação de K dos grãos e condutividade elétrica; (3) manejar K com atenção ao antagonismo com Mg e à presença de Cl^- , escolhendo fontes e combinações coerentes com a meta sensorial e o custo; (4) construir COT de forma continuada (resíduos, cobertura, organominerais, manejo conservacionista), pois esta é uma das alavancas mais consistentes para aumentar a disponibilidade de P em solos tropicais; e (5) manter acidez em faixa moderada com calagem criteriosa para elevar Ca e Mg e reduzir a fixação de fosfato e a toxicidade por Al^{3+} . O resultado, quando essas peças se encaixam, é um sistema mais eficiente no uso de nutrientes, com grãos fisicamente superiores e um perfil sensorial mais doce, limpo e estável ao longo dos anos, exatamente o que o mercado de cafês especiais tende a premiar.

RECOMENDAÇÃO TÉCNICA E PRÁTICA DE ADUBAÇÃO PARA CAFEEIROS

1) Princípios gerais que estruturam a recomendação

Adubar café com consistência ao longo de anos exige alinhar três pilares: diagnóstico (solo e folha), expectativa de produção e eficiência de aplicação e da fonte do nutriente. No diagnóstico, a análise de solo orienta o que corrigir e repor; a análise foliar indica como a planta respondeu ao manejo e onde ajustar o fino (especialmente nitrogênio, potássio e micronutrientes de baixa mobilidade, como boro e zinco). Como o cafeeiro alterna anos de maior e menor carga, recomenda-se estimar a produtividade com critério; quando a safra esperada estiver muito abaixo da anterior de “alta”, trabalhe-se com a média entre as duas para não reforçar a bienalidade. Esse cuidado, combinado com adubação equilibrada e parcelada, é parte central do manejo que amortece oscilações de safra.

No campo, a eficiência vem dos “4C”: fertilizante certo, dose certa, lugar certo e momento certo. Em café de sequeiro, parcelar N e K em 3–4 aplicações ao longo do período chuvoso reduz perdas por volatilização e lixiviação. A localização sob a saia (de ambos os lados da planta, de preferência) coloca o nutriente na zona de maior densidade de raízes ativas, elevando a resposta por unidade aplicada. Em sistemas irrigados, a fertirrigação dilui as doses em aplicações mais frequentes, com efeitos práticos semelhantes: mais aproveitamento, menos perda.

2) Calagem e gessagem

A calagem é a base química do ambiente radicular do cafeeiro. Ela eleva a saturação por bases, neutraliza Al^{3+} tóxico, fornece Ca e Mg e aumenta a CTC efetiva; por consequência, melhora a disponibilidade de P

e a eficiência de N e K. Em sistemas de café, a calagem em profundidade (incorporada no preparo antes do plantio) favorece a exploração radicular em subsuperfície, reduzindo a dependência da camada superficial úmida apenas nas primeiras chuvas. Em lavouras já estabelecidas, doses anuais menores e recorrentes, concentradas no domínio radicular, mantêm o pH em faixa favorável e repõem Ca/Mg removidos pela colheita e lixiviação.

O gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) não corrige pH, mas fornece Ca e S e carrega Ca^{2+} para camadas mais profundas, melhorando a estrutura e a química da subsuperfície (saturação de bases e relação Ca:Al) e criando um “corredor” radicular para água e nutrientes. Em solos com acidez subsuperficial e baixos teores de Ca em profundidade, o gesso é valioso como complemento da calagem. Na implantação, o aporte de S também pode vir do superfosfato simples e, posteriormente, do sulfato de amônio quando parte do N é fornecida nessa forma.

Diretriz prática: calagem dimensionada pela análise de solo e aplicada antes da adubação fosfatada; gessagem usada como ferramenta de perfil, quando indicada pela química de subsuperfície. O capítulo específico de calagem/gessagem do livro cobre os cálculos; aqui reforçamos porque essas correções tornam a adubação mais eficiente ao longo do ciclo.

3) Adubação de plantio

Objetivo agrônomo: estabelecer um ambiente quimicamente favorável e profundo para raízes novas, oferecendo fósforo localizado (difusão curta), suprir potássio em solos pobres, adicionar S e iniciar a dinâmica biológica com matéria orgânica.

Como compor a adubação de cova/sulco

Matéria orgânica bem curtida/composto: misturada ao solo da cova melhora a estrutura, aumenta CTC, complexa Al e contribui com micronutrientes. Como referência de montagem de cova: um berço típico de $0,25 \times 0,20 \times 0,30$ m contém $\sim 15 \text{ dm}^3$ de solo; numa relação solo:MO 4:1, cabem cerca de 3 L de MO misturada a 12 L de terra. Isso não substitui a adubação mineral, mas complementa e a torna mais eficiente.

Fósforo (P_2O_5): pela baixa mobilidade, deve ser aplicado no plantio e em profundidade, incorporado e homogeneizado ao solo da cova/sulco. A dose depende do teor de P no solo (método do seu laboratório) e da textura: solos argilosos demandam mais P para superar fixação, arenosos pedem menos. Fontes usuais: superfosfato simples (traz Ca e S), MAP ou misturas formuladas; escolha pela disponibilidade e pelo balanço com S/Ca no sistema.

Potássio (K_2O): a aplicação na cova/sulco é obrigatória quando a análise indica baixa disponibilidade. Embora mudas demandem pouco K, antecipar parte do aporte em profundidade favorece a reserva inicial e o crescimento vegetativo. Em solos argilosos usa-se a dose calculada para atingir o teor-alvo na cova; em solos arenosos, reduz-se a dose proporcionalmente para evitar salinização. Fontes: KCl, K_2SO_4 (este último agrega S e é útil quando há restrição a cloreto).

Enxofre (S): entra pelo SSP na cova/sulco e segue vindo com sulfato de amônio em coberturas dos dois primeiros anos. Alternativamente, gesso agrícola no plantio supre S e Ca de forma gradual.

Micronutrientes: a MO costuma atender o arranque; se o histórico/solo for pobre, considerar B e Zn já na fase inicial, com cautela para evitar excesso (janelas entre suficiência e toxicidade são estreitas). Quando necessário, corrige-se B no solo e Zn via folha mais adiante.

Operacional: misture totalmente o adubo ao solo, evitando a formação de bolsões concentrados e contato direto grânulo-raiz. Em plantio em sulco, calcule as doses por dm^3 de solo efetivamente incorporado (a metade inferior do sulco, onde de fato se mistura terra e fertilizantes) e distribua ao longo da linha antes do fechamento.

4) Adubação de formação

Objetivo agrônômico: construir copa e raiz com crescimento contínuo, sem estimular desequilíbrios vegetativos, e preparar a planta para entrar na produção com arquitetura e reservas adequadas.

Como dimensionar as doses

N (arranque e vigor): no 1º e 2º anos, a dose parte de uma tabela que considera sistema de plantio (convencional × adensado) e, no 2º ano,

adiciona-se a eventual demanda dos frutos se houver produção precoce. Em linhas gerais, à medida que o espaçamento adensa, a dose por planta diminui e a dose por área aumenta (mais plantas por hectare aproveitando melhor o fertilizante). Uma fração do N pode vir como sulfato de amônio para garantir S no sistema.

P e K (arquitetura radicular e balanço osmótico): calculados conforme teor do nutriente no solo e idade/sistema. O P segue crítico na formação de raízes e deve continuar localizado; o K avança à medida que a copa expande e as primeiras frutificações se aproximam.

Quando e onde aplicar

Em sequeiro, parcelar na estação chuvosa: por exemplo, 3 aplicações (início das águas, meio e final das águas). Posicionar o adubo sob a saia do cafeeiro, de ambos os lados da planta, ampliando o contato com as raízes absorventes.

Em irrigado, fertirrigações mais frequentes com N e K, mantendo P sobretudo em aplicação no solo (ou fertirrigado com fontes compatíveis), sempre evitando concentrações elevadas no bulbo para não salinizar.

Como expressar por planta e por hectare?

Na formação, muitas recomendações vêm por planta (g/planta) e variam com o adensamento. Para planejar a logística, converta para kg/ha multiplicando pela população efetiva. Exemplo de conversão (meramente ilustrativo do cálculo): se uma orientação técnica para o seu espaçamento indicar 120 g de N por planta e você tiver 5.000 plantas/ha, isso corresponde a 600 kg de N/ha no ano; dividindo em 3 parcelas, cada passada leva 200 kg de N/ha (ajuste finamente conforme análise foliar e resposta do talhão).

5) Adubação de produção

Objetivo agronômico: sustentar a exportação anual pelos frutos e a manutenção da estrutura (ramos e folhas), modulando as doses para não amplificar a bienalidade.

Como dimensionar as doses

Trabalha-se com a produtividade esperada da safra, a situação do solo (P e K) e, quando disponível.

Um exemplo real de combinação dessas variáveis, para um cenário de solo com P e K baixos e expectativa de colheita relevante, conduz a um patamar da ordem de N 450 kg/ha/ano, P_2O_5 80 kg/ha/ano e K_2O 450 kg/ha/ano. Essa razão $N:P_2O_5:K_2O \approx 5,6:1:5,6$ é útil para orientar a escolha de fórmulas comerciais ou misturas simples que atinjam o alvo com o mínimo de passadas.

Por planta x por hectare (e exemplo de campo). As tabelas usadas em café permitem também ler a necessidade por planta em g/planta quando se trabalha com “litros de cereja por planta” e a faixa de plantas/ha. Para ilustrar o raciocínio: uma combinação comum em cafezal de menor população pode determinar algo como ~150 g de N, ~28 g de P_2O_5 e ~150 g de K_2O por planta num ano de maior demanda. Em 4.000 plantas/ha, isso significaria, por hectare, cerca de 600 kg N, 112 kg P_2O_5 e 600 kg K_2O . Perceba que a leitura “por planta” muda com adensamento e com a produtividade pendente; por isso, no planejamento de compras, sempre traduza para kg/ha do seu talhão, validando com solo/folha.

Parcelamento e época

Em sequeiro, 3 a 4 aplicações: uma pós-florada (repor reservas), uma na fase de expansão (fixação), uma na granação e, quando apropriado, uma pós-colheita voltada à rebrota e recuperação.

Em irrigado, dividir N e K em passadas semanais ou quinzenais na água de irrigação durante o período ativo. P pode entrar como ácido fosfórico/fosfato compatível ou em aplicações sólidas estrategicamente posicionadas.

Localização e perdas

Depositar o adubo sob a saia, alcançando os dois lados da planta, é operacionalmente simples e aumenta a eficiência de N e K.

Para N, perdas por volatilização (ureia) e lixiviação (principalmente em solos arenosos) requerem parcelas menores e aplicação em solo úmido

ou com chuva prevista. Alternar fontes (ureia, sulfato/nitrato de amônio) ajuda a manejar perdas e, no caso do sulfato, acrescenta S.

Em relação ao S, quando não há análise de S no solo, práticas regionais trabalham como regra de bolso entre $\sim 1/8$ da dose de N como S em cenários de baixo S, reduzindo para $\sim 1/16$ quando o S do solo está em faixa média; muitas fórmulas comerciais já entregam parte desse S.

Micronutrientes estratégicos na produção

Boro (B): essencial ao pegamento floral, tem baixa mobilidade na planta; por isso, o foco é no solo. Em solos/carreiros pobres em B, a estratégia é fracionar a aplicação ao solo em 2–3 passadas ao longo das águas (dose anual típica na ordem de 2–3 kg de B/ha, ajustada pela análise). Em situações de deficiência aguda, usa-se foliar emergencial com ácido bórico a $\sim 0,5\%$ (5 g/L), sem renunciar ao aporte ao solo para sustentar o ciclo seguinte.

Zinco (Zn): responde bem a pulverizações foliares durante o pico de crescimento vegetativo (primavera-verão), com sulfato de zinco heptahidratado a $\sim 0,5\%$ (5 g/L) ou quelatos equivalentes; 2 aplicações no período normalmente corrigem o quadro.

Manganês e cobre entram conforme análise e histórico fitossanitário; muitas vezes o cobre vem pelos fungicidas e já compõe o balanço.

Quantidades ligadas à exportação de nutrientes

Cada saca de 60 kg de café beneficiado retira do sistema principalmente N e K; valores médios de literatura empregam, por saca, aproximadamente $\sim 6,2$ kg de N, $\sim 0,6$ kg de P_2O_5 e $\sim 5,9$ kg de K_2O . Essa ótica de “reposição por saca” é complementar ao método por análise de solo/folha e ajuda a checar se o plano não está subalimentando lavouras de alta carga.

6) Manejo para reduzir bienalidade (ligando teoria e práticas)

A bienalidade aumenta quando a lavoura “se esvazia” num ano alto e não recompõe reservas para o ano seguinte. Três decisões reduzem esse efeito:

- Estimar a dose usando a média entre a safra de alta (anterior) e a esperada quando a próxima estiver bem abaixo — isso amortece a queda;
- Parcelar N e K para combinar oferta e demanda e diminuir perdas;
- Não negligenciar pós-colheita (aporte para recompor folhas e ramos que sustentarão a safra seguinte). Somam-se a isso a manutenção de Ca e Mg via calagem, S no sistema, e a correção oportuna de B e Zn para favorecer floração e fixação.

7) Boas práticas operacionais (indispensáveis)

Amostragem: solo por talhão homogêneo, profundidades usuais (superfície e subsuperfície de interesse do sistema radicular) e histórico da área; coleta foliar na pré-floração, seguindo o protocolo do seu laboratório (par de folhas, parte do ramo e número de plantas amostradas).

Compatibilidade de fontes: nenhuma mistura “caseira” sem checar compatibilidade (ex.: ureia com ácido fosfórico exige manejo cuidadoso; misturas com boro/zinco em tanque pedem teste prévio).

Clima e umidade: em cobertura sólida, evitar aplicar antes de dias secos e quentes; preferir solo úmido e previsão de chuva moderada.

Distribuição: bandas sob a saia, dos dois lados. Em grânulos, aplicar por cima da saia deixa o produto “descer” entre folhas até o solo sem queimar a folhagem.

Documentação: registrar data, produto, dose (por planta e por hectare), umidade do solo e observações; cruzar com análises para melhorar a decisão no ciclo seguinte.

8) Resumo aplicado por fase de vida da planta.

Plantio — Misture ao solo da cova P em profundidade (fonte conforme estratégia: SSP, MAP etc.) de acordo com o teor de P do solo e a textura; forneça K na cova quando o solo indica carência, respeitando o tipo de solo (menos em arenosos para evitar salinização); garanta S via SSP/gesso e complete Ca/Mg via calagem prévia. Adicione MO bem curtida (referência: cerca de 3 L numa cova padrão de 15 dm³) para melhorar

a física e química do berço. Em áreas com histórico de B e Zn baixos, considere um arranque cauteloso desses micronutrientes, priorizando B no solo e Zn mais à frente via folha.

Formação (1°–2° anos) — Estruture N com base no sistema de plantio (menor g/planta em adensados, mas maior kg/ha), utilizando parte como sulfato de amônio para levar S junto; ajuste P e K conforme teores no solo. Em sequeiro, divida em 3 passadas ao longo das águas; em irrigado, faça fertirrigações frequentes com N e K, mantendo P preferencialmente em aplicação localizada no solo. Posicione sempre sob a saia, dos dois lados. Se houver frutificação precoce no 2° ano, acrescente a demanda dos frutos ao cálculo anual.

Produção — Defina as quantidades combinando produtividade esperada, níveis de P e K no solo e folha para ajuste de N. Como referência prática de cenário exigente, trabalha-se em torno de N ~450 kg/ha/ano, P_2O_5 ~80 kg/ha/ano e K_2O ~450 kg/ha/ano, modulando conforme talhão e metas. Uma leitura “por planta” de ~150 g de N + ~28 g de P_2O_5 + ~150 g de K_2O pode ocorrer em lavouras menos adensadas e alto potencial; converta sempre para kg/ha segundo a sua população. Em sequeiro, 3–4 parcelas (pré-florada a granação, com reforço pós-colheita quando adequado); em irrigado, quinzenais/semanais via fertirrigação. B deve entrar no solo (complementar foliar só se déficit for agudo); Zn responde bem a 0,5 % de sulfato de zinco em 2 pulverizações na estação de maior crescimento. Para S, assegure a fração proporcional ao N (regra prática do sistema, quando o solo não informa S), lembrando que formulados NPK e sulfato de amônio já contribuem. E, sempre, localize sob a saia dos dois lados para aproveitar raízes ativas e reduzir perdas.

DESAFIOS FUTUROS E INOVAÇÕES EM FERTILIDADE E NUTRIÇÃO NA CAFEICULTURA

A cafeicultura brasileira vive um tempo em que a resiliência virou sinônimo de competitividade. Clima mais extremo, solos heterogêneos, preços e disponibilidade de fertilizantes sujeitos ao câmbio: tudo isso pressiona o manejo e pede escolhas técnicas que preservem margem sem abrir mão de sanidade, vigor e qualidade. Nesse contexto, fertilidade do solo e nutrição deixam de ser apenas “o que e quanto aplicar” e passam a ser sobretudo como, quando e onde aplicar, com base em diagnóstico, execução simples e verificação contínua dos resultados.

O primeiro desafio é lidar com a variabilidade do solo e da lavoura. Em muitas regiões cafeeiras, diferenças de relevo, textura, histórico de manejo e erosão fazem com que talhões respondam de forma desigual aos insumos. A inovação aqui não precisa ser complicada: amostragem estratificada por zonas de manejo, mapas simples de pH, V%, P e K, e recomendações ajustadas à realidade de cada zona já transformam um programa nutricional. É a agricultura de precisão na sua versão mais acessível. Quando possível, a aplicação a taxa variável de calcário, gesso e de P/K reduz desperdícios e aumenta a uniformidade.

Drones e imagens de satélite ajudam a identificar desuniformidades de copa e a priorizar áreas, mas o coração do processo continua sendo a repetibilidade: amostrar as mesmas zonas, nas mesmas janelas, comparando tendências ao longo das safras. Com essa disciplina, a fazenda aprende com os próprios dados e para de “adubar pela média”.

O segundo eixo é o casamento fino entre nutrição e clima. Janelas de chuva mais curtas, veranicos no meio da estação e ondas de calor elevam perdas por volatilização e lixiviação e, por consequência, derrubam a eficiência do adubo. A resposta começa no planejamento: programar

adubações para coincidirem com chuva ou irrigação, evitar aplicações superficiais em dias muito quentes e secos e, quando a incorporação não é viável, priorizar ureia com inibidor de urease. O fósforo rende mais quando aplicado de forma localizada, limitando o contato com o solo; o potássio, em ambientes arenosos ou sob risco de chuva concentrada, responde bem a fracionamentos menores e mais frequentes. Em áreas irrigadas, a fertirrigação permite sincronizar oferta e demanda com precisão, desde que se monitore salinidade, uniformidade de aplicação e estado hídrico do solo/planta. A mensagem prática é simples: o mesmo nutriente pode ter eficácias muito diferentes dependendo da forma e do momento.

Na eficiência do uso de nutrientes, as chamadas “tecnologias elevadoras de eficiência” oferecem ganhos reais quando bem posicionadas. Ureia com inibidor de urease reduz perdas por volatilização quando a aplicação superficial é inevitável; em cenários específicos (logística apertada, textura arenosa, irrigação regular) fontes de liberação controlada ajudam a simplificar calendários e a diminuir picos e vales de disponibilidade. Inibidores de nitrificação podem compor a estratégia, respeitando solo, clima e sistema de aplicação. Nada disso substitui o básico: calagem bem feita e, quando necessário, gessagem para melhorar o ambiente radicular em profundidade. É comum ver tentativas de “sofisticação” de fontes sem correção adequada de pH; nesse caso, paga-se mais por um benefício que o solo não consegue entregar.

Tratar o solo como capital biológico é a terceira perna da resiliência. Matéria orgânica, estabilidade de agregados, porosidade e microbiota determinam quão bem a lavoura aproveita o adubo e suporta estresses. Organominerais de boa procedência, compostos e esterco estabilizados, aliados a adubação verde e manejo de palhada, constroem um ambiente que retém água, cicla nutrientes e protege contra extremos. Bioinsumos podem somar, desde que usados com finalidade clara: solubilizadores de fósforo em solos com alto poder de fixação, promotores de crescimento para estimular raiz em fases críticas, micorrizas em condições em que a simbiose seja tecnicamente indicada. O ponto-chave é rastreabilidade e avaliação: produto registrado, dose e época definidas, talhão marcado e comparação com área espelho. Sem esse registro, não há como separar sorte de resultado.

Há também um componente de gestão de risco que não se resolve apenas com agronomia. A dependência brasileira de fertilizantes importados mantém a operação exposta à volatilidade de preço e disponibilidade. A estratégia prudente combina metas de produtividade por talhão (e não metas genéricas de fazenda), simulação de cenários de adubação (convencional versus com EEFs e/ou organominerais) e compras escalonadas. Em vez de “apostar a fazenda” numa única tecnologia, vale diversificar parcialmente as fontes e testar em áreas comparáveis, medindo custo por saca e tendência dos atributos do solo. Essa lógica dilui riscos, protege o caixa e mantém flexibilidade para ajustes durante a safra.

Para que tudo isso funcione, vale adotar um painel mínimo de acompanhamento que caiba em uma única página. Por fazenda (ou por unidade de manejo), monitorar produtividade por talhão e seu coeficiente de variação, pH e V% nas zonas de manejo, teores de P e K, uma leitura anual de matéria orgânica e, sobretudo, três indicadores de eficiência: NUE, PUE e KUE, mapeando quantos quilos de café são produzidos por quilo de nutriente aplicado. Some-se a isso o custo nutricional por saca e a eficácia de aplicação (planejado versus aplicado). São números simples, mas que mudam a conversa: eles permitem comparar estratégias, justificar tecnologias e, principalmente, aprender de uma safra para a outra.

A execução ao longo do ciclo fenológico pode ser enxuta e efetiva. No pós-colheita, foca-se em recuperar a planta, construir raiz e copa para a próxima florada: correção de solo (calagem e gesso quando indicado) e suprimento de N e K com fontes e formas de menor perda. Na pré-florada, assegurar pH e cálcio em perfil e manter fósforo disponível. Durante granação e enchimento, o potássio sustenta transporte e qualidade; o manejo do N evita excessos tardios que atrapalhem maturação. Na pré-colheita, adubações que aumentem risco de perda de qualidade devem ser evitadas, e o esforço se volta a consolidar registros e preparar o próximo ciclo. Notará que nada disso exige uma tecnologia mirabolante, e sim ordem, oportunidade e consistência.

Por fim, é importante ajustar a linguagem ao público que está na lida diária. Para estudantes, o foco deve estar em princípios (porque a volatilização acontece, como a fixação de fósforo age, o que muda no balanço de cargas quando se corrige o pH) e em métodos de medição.

Para técnicos, protocolos padronizados de amostragem, interpretação e recomendação, além de auditorias simples de execução, fazem a diferença entre um plano “de papel” e um manejo que muda resultado. Para produtores, o segredo está em escolher duas ou três inovações que caibam na operação (por exemplo, ureia com inibidor de urease, recomendação em zonas de manejo e um piloto com organomineral) e repeti-las bem feitas, ano após ano, ajustando o rumo com base nos indicadores.

Resiliência, portanto, não é colecionar tecnologias, é fazer o essencial com precisão e incorporar inovações que aumentem a eficiência do nutriente por saca produzida, reduzam perdas nas janelas críticas e construam um solo mais vivo e estável. Em um ambiente de clima incerto e insumos voláteis, essa combinação (diagnóstico de qualidade, fontes e formas eficientes, e solo tratado como patrimônio) é o que permite atravessar as safras difíceis e capturar plenamente as boas, com produtividade, qualidade e sustentabilidade caminhando juntas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fertilidade do solo e a nutrição mineral do cafeeiro representam, conjuntamente, um dos pilares mais determinantes para a produtividade, a qualidade do grão e a sustentabilidade do sistema cafeeiro brasileiro. Ao longo deste livro, buscou-se oferecer um conteúdo técnico, atualizado e aplicável, voltado aos diferentes perfis de leitores, sejam técnicos de campo, estudantes em formação ou cafeicultores em busca de maior autonomia e eficiência produtiva.

Ficou evidente que a gestão nutricional da cultura do café não pode ser tratada de forma genérica ou padronizada. Cada ambiente de produção possui características edafoclimáticas, históricas e operacionais distintas, exigindo uma abordagem integrada baseada em diagnósticos confiáveis (análises químicas, físicas e biológicas do solo, além de análises foliares), tecnologia de aplicação, planejamento agrônomo e interpretação científica dos resultados.

O uso responsável de insumos, aliado a práticas regenerativas, como adubação verde, uso de bioinsumos, rotação e cobertura permanente do solo, deve ser visto como um avanço não apenas técnico, mas também ético e ambiental. A cafeicultura do futuro será, necessariamente, mais eficiente no uso dos nutrientes, mais equilibrada em termos biológicos e mais comprometida com a saúde do solo, o maior patrimônio natural do produtor.

Ao dominar os fundamentos da nutrição mineral e compreender a dinâmica do solo, o profissional do campo amplia sua capacidade de tomada de decisão, reduz desperdícios e maximiza o retorno econômico. Mais do que aplicar fertilizantes, trata-se de manejar processos.

Que este material possa servir como base técnica, referência de consulta e estímulo à adoção de práticas agronomicamente corretas, economicamente viáveis e ecologicamente sustentáveis. O solo é um organismo vivo, e o conhecimento sobre ele é o primeiro passo para uma cafeicultura mais resiliente, rentável e duradoura.



AGRADECIMENTOS

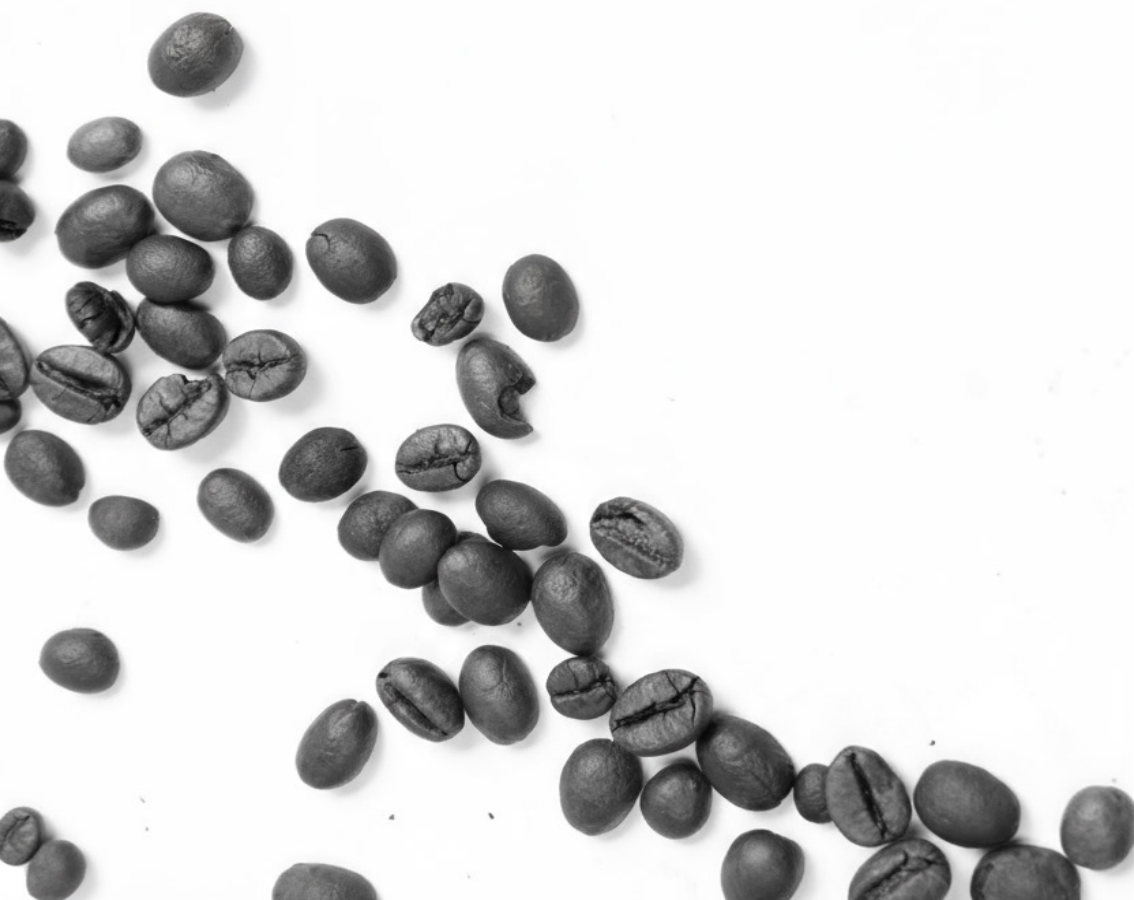
A organização deste livro só foi possível graças à contribuição direta e indireta de diversos profissionais, instituições e experiências acumuladas ao longo dos anos no campo da agronomia e da cafeicultura.

Agradeço aos pesquisadores e extensionistas que, com seu trabalho incansável, têm promovido avanços no entendimento sobre a fertilidade do solo e a nutrição mineral no cafeeiro. Os dados aqui apresentados foram fundamentados em publicações científicas de referência nacional e internacional, muitas das quais oriundas de instituições como a EMBRAPA Café, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a Universidade Federal de Lavras (UFLA), a EPAMIG, a Fundação Procafé, entre outras que fortalecem a pesquisa agrícola no Brasil.

Estendo minha gratidão aos cafeicultores que, em diversas regiões do país, são verdadeiros laboratórios vivos de inovação e manejo sustentável, cujas experiências práticas inspiraram a abordagem realista adotada neste material.

Também agradeço aos professores, estudantes e técnicos agrícolas (cada um com seu papel) que, por meio da educação e da transferência de tecnologia, mantêm viva a vocação da cafeicultura brasileira de produzir com qualidade, responsabilidade e excelência agrônoma.

Por fim, dedico este trabalho à nova geração de profissionais do campo, que busca conciliar ciência e prática com ética, precisão e respeito ao solo e às plantas.



REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C. & RODELLA, A.A. *Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos*. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ V., V.H. eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.291334.
- ALLOWAY, B. J. *Zinc in soils and crop nutrition*. 2. ed. Brussels: International Zinc Association; Paris: International Fertilizer Industry Association, 2008.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F. de; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. *Determinação e uso do fósforo remanescente*. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.27-32, 2000.
- ARAÚJO, L. G. et al. (2014). Organic matter fractions in soil under coffee with split applications of phosphorus and water regimes. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 18(10), 1017–1022. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1017-1022>.
- BARROS, M. M.; VOLPATO, C. E. S.; SILVA, F. C.; PALMA, M. A. Z.; SPAGNOLO, R. T. Avaliação de um sistema de aplicação de fertilizantes a taxa variável adaptado à cultura cafeeira. *Coffee Science*, Lavras, v. 10, n. 2, p. 223–232, 2015.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. *Métodos de análise química de plantas*. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).
- BERTON, R. S.; PRATT, P. F.; FRANKENBERGER JR., W. T. Disponibilidade de fósforo estimada por três métodos químicos e pela atividade de duas enzimas em solos que receberam incorporação de materiais orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, n. 4, p. 617–624, 1997.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, Amsterdam, v. 124, p. 3-22, 2005.
- CAIRES, E. F., CHURKA, S., GARBUIO, F. J., FERRARI, R. A., & MORGANO, M. A.. (2006). *Soybean yield and quality a function of lime and gypsum applications*. *Scientia Agricola*, 63(4), 370–379.

CAIRES, E. F.; GUIMARÃES, A. M. A Novel Phosphogypsum Application Recommendation Method under Continuous No-Till Management in Brazil. *Agronomy Journal* - Soil Fertility and Crop Nutrition, v. 110, n. 5, p. 1987-1995, 2018.

C.E. CARDUCCI, G.C. OLIVEIRA, N. CURI, R.J. HECK, D.F. ROSSONI, T.S. DE CARVALHO, A.L. COSTA. *Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol*, Soil and Tillage Research, v. 145, p. 171-180, 2015.

CARDUCCI, C. E.; G. C. de OLIVEIRA (Org). *Manejo do solo na cafeicultura: produtividade e sustentabilidade*. Lavras: Editora UFLA, 2021, 135p.

CARELLI, M.L.C. *et al.* Aspects of nitrogen metabolism in coffee plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 18(1):9-21, 2006.

CHAGAS, W.F.T. *et al.* NITROGEN FERTILIZERS TECHNOLOGIES FOR COFFEE PLANTS. *Coffee Science*, v. 14, n. 1, p. 55–66, 2019.

CHANDON, E., NUALKHAO, P., VIBULKEAW, M. *et al.* Mitigating excessive heat in Arabica coffee using nanosilicon and seaweed extract to enhance element homeostasis and photosynthetic recovery. *BMC Plant Biol* 24, 1064 (2024).

CHAVES, J.C.D. *Manejo do solo: adubação e calagem, antes e após a implantação da lavoura cafeeira*. Londrina: IAPAR, 2002. 36 p. (Circular 120).

CLEMENTE, J. M., MARTINEZ, H. E. P., ALVES, L. C., FINGER, F. L., & CECON, P. R. (2015). Effects of nitrogen and potassium on the chemical composition of coffee beans and on beverage quality. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 37(3), 297–305.

DE SOUSA, T. R., DE CARVALHO, A. M., RAMOS, M. L. G., DE OLIVEIRA, A. D., DE JESUS, D. R., DA FONSECA, A. C. P., DA COSTA SILVA, F. R., DELVICO, F. M. D. S., JUNIOR, F. B. D. R., & MARCHÃO, R. L. (2024). *Dynamics of Carbon and Soil Enzyme Activities under Arabica Coffee Intercropped with Brachiaria decumbens in the Brazilian Cerrado*. *Plants*, 13(6), 835.

DUTRA, M. P., SARKIS, L. F., OLIVEIRA, D. P., SANTIAGO, H. D. A., RESENDE, G. T. D. S., DE MELO, M. E. A., DA FONSECA, A. B., LÓPEZ, C. J. H., SILVA, E. D. S., ZAQUEU, A. D. S., DE LIMA, G. H. F., SILVA, J. M., POZZA, A. A. A., & GUELF, D. (2025).

Cutting-Edge Technology Using Blended Controlled-Release Fertilizers and Conventional Monoammonium Phosphate as a Strategy to Improve Phosphorus Coffee Nutrition During the Coffee Development Phase. *Soil Systems*, 9(2), 47.

ECOFRIENDLY COFFEE. *Nitrogen economy inside coffee plantations*. 2023. Disponível em: <https://ecofriendlycoffee.org/nitrogen-economy-inside-coffee-plantations/>.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DE MINAS GERAIS – EMATER-MG. *Manual do Café: Manejo de Cafezais em Produção*. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400 p.

FAGERIA, N.K., BALIGAR, V.C., & CLARK, R. (2006). *Physiology of Crop Production (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482277807>.

FAGERIA, N.K., BALIGAR, V.C., & JONES, C.A. (2010). *Growth and Mineral Nutrition of Field Crops (3rd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10160>.

FAQUIN, V. *Nutrição mineral de plantas*. Lavras: UFLA, 2005. 186 p.

FARNEZI, M. M. DE M., SILVA, E. DE B., & GUIMARÃES, P. T. G.. (2009). Diagnose nutricional de cafeeiros da região do Alto Jequitinhonha (MG): normas dris e faixas críticas de nutrientes. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 33(4), 969–978. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400021>.

FENILLI, T. A. B., REICHARDT, K., FAVARIN, J. L., BACCHI, O. O. S., SILVA, A. L., & TIMM, L. C.. (2008). Fertilizer 15N balance in a coffee cropping system: a case study in Brazil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 32(4), 1459–1469. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400010>.

FERRAZ, G. A. E. S., SILVA, F. M. DA ., CARVALHO, F. DE M., COSTA, P. A. N. DA ., & CARVALHO, L. C. C.. (2011). Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. *Engenharia Agrícola*, 31(5), 906–915. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000500008>.

GUARÇONI, A. *Saturação por bases para o cafeeiro baseada no ph do solo e no suprimento de Ca e Mg*. Coffee Science, Lavras, v. 12, n. 3, p. 327–336, jul./set. 2017.

- LIMA FILHO, O. F. DE ., & MALAVOLTA, E.. (2003). Studies on mineral nutrition of the coffee plant (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Vermelho): LXIV. Remobilization and re-utilization of nitrogen and potassium by normal and deficient plants. *Brazilian Journal of Biology*, 63(3), 481–490.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Ceres, 2006. 631 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MANCUSO, M. A. C., SORATTO, R. P., CRUSCIOL, C. A. C., & CASTRO, G. S. A.. (2014). Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 38(5), 1448–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500010>.
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012. 651 p.
- MARTINEZ, H. E. P., CLEMENTE, J. M., LACERDA, J. S. DE ., NEVES, Y. P., & PEDROSA, A. W.. (2014). Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. *Revista Ceres*, 61, 838–848. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201461000009>.
- MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A. W. R.; ALMEIDA, S. R.; FERNANDES, D. R. *Cultura do café no Brasil: manual de recomendações*. Varginha: Fundação Procafé, 2020. 716 p.
- MONICELLI, F., CUNHA, K. P. V. DA ., ARAÚJO, F., & BECKER, V.. (2021). Phosphorus sorption potential of natural adsorbent materials from a Brazil semiarid region to control eutrophication. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 33, e29.
- MOREIRA, D.T. et al. Determination of physical and chemical quality of coffee beans under improved potassium fertilization managements. *Coffee Science*, v. 16, p. 1–10, 2021.
- MOTA, R. P. et al. Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): Fertilizer levels and application times. *Coffee Science*, Lavras, v. 18, p. e182098, 2023.

NASCIMENTO, M. O., COSTA CELESTINO, S. M., VEIGA, A. D., DE JESUS, B. D. A., & DE LACERDA DE OLIVEIRA, L. (2024). Quality of Arabica coffee grown in Brazilian Savannah and impact of potassium sources. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 188, 114500. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114500>

NOVAIS, R. F. et al. *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS, 2007.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NUNES, R. DE S., SOUSA, D. M. G. DE., GOEDERT, W. J., & VIVALDI, L. J.. (2011). Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 35(3), 877–888. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300022>.

OLIVEIRA, L. L., NASCIMENTO, M. O., & CELESTINO, S. M. C. (2025). Integrating optimized descriptive profile, consumer acceptance, and textual analysis to assess coffee beverage quality: Exploring potassium fertilization in Brazil's Central Plateau. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 212, 116525.

PARECIDO, R. J., SORATTO, R. P., GUIDORIZZI, F. V. C., PERDONÁ, M. J., & GITARI, H. I. (2021). Soil application of silicon enhances initial growth and nitrogen use efficiency of Arabica coffee plants. *Journal of Plant Nutrition*, 45(7), 1061–1071.

PAUL, E. A. et al. *Soil microbiology, ecology, and biochemistry*. 4. ed. Oxford: Academic Press, 2013, 603 p.

PAVINATO, P. S., & ROSOLEM, C. A.. (2008). Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 32(3), 911–920.

PEREIRA, M. G., LOSS, A., BEUTLER, S. J., & TORRES, J. L. R.. (2010). Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(5), 508–514.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. *Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo/FUNDAG, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100)

- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359 p.
- RODRIGUES, M. J. L., DA SILVA, C. A., BRAUN, H., & PARTELLI, F. L. (2023). Nutritional Balance and Genetic Diversity of *Coffea canephora* Genotypes. *Plants*, 12(7), 1451.
- RODRIGUES, F. A., CARRÉ-MISSIO, V., JHAM, G. N., BERHOW, M., & SCHURT, D. A.. (2011). Chlorogenic acid levels in leaves of coffee plants supplied with silicon and infected by *Hemileia vastatrix*. *Tropical Plant Pathology*, 36(6), 404–408.
- SANTOS, C., MALTA, M. R., GONÇALVES, M. G. M., BORÉM, F. M., POZZA, A. A. A., MARTINEZ, H. E. P., DE SOUZA, T. L., CHAGAS, W. F. T., DE MELO, M. E. A., OLIVEIRA, D. P., LIMA, A. D. C., DE ABREU, L. B., REIS, T. H. P., DE SOUZA, T. R., BUILES, V. R., & GUELFI, D. (2023). Chloride Applied via Fertilizer Affects Plant Nutrition and Coffee Quality. *Plants*, 12(4), 885.
- SANTOS, D. R. DOS ., GATIBONI, L. C., & KAMINSKI, J.. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576–586. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>.
- SILVA, É. A. DA ., OLIVEIRA, G. C. DE ., SILVA, B. M., CARDUCCI, C. E., AVANZI, J. C., & SERAFIM, M. E.. (2014). Aggregate stability by the “high energy moisture characteristic” method in an oxisol under differentiated management. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 38(5), 1633–1642.
- SILVA, E. DE B., NOGUEIRA, F. D., GUIMARÃES, P. T. G., CHAGAS, S. J. DE R., & COSTA, L.. (1999). Fontes e doses de potássio na produção e qualidade do grão de café beneficiado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(3), 335–345. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000300003>.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. Cap. “Correção da acidez do solo”, p. 81–96.
- SOUZA, R. F. DE ., FAQUIN, V., TORRES, P. R. F., & BALIZA, D. P.. (2006). Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 30(6), 975–983.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021. 888 p.

TISDALL, J.M. and OADES, J.M. (1982), *Organic matter and water-stable aggregates in soils*. Journal of Soil Science, 33: 141-163.

VALADARES, S. V., NEVES, J. C. L., ROSA, G. N. G. P., MARTINEZ, H. E. P., VENEGAS, V. H. A., & LIMA, P. C. DE .. (2013). Produtividade e bienalidade da produção de cafezais adensados, sob diferentes doses de N e K. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(3), 296–303.

