

# NUTRIÇÃO MINERAL DO FEIJOEIRO



*Nand Kumar Fageria  
Luís Fernando Stone  
Alberto Baêta dos Santos  
Maria da Conceição Santana Carvalho*

NUTRIÇÃO MINERAL DO  
**FEIJOEIRO**



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Arroz e Feijão  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

# NUTRIÇÃO MINERAL DO FEIJOEIRO

*Nand Kumar Fageria  
Luís Fernando Stone  
Alberto Baêta dos Santos  
Maria da Conceição Santana Carvalho*

***Embrapa***  
*Brasília, DF*  
*2015*



Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:

**Embrapa Arroz e Feijão**

Rod. GO 462, km 12  
Caixa Postal 179  
CEP 75375-000  
Santo Antônio de Goiás, GO  
Fone: (62) 3533 2110  
Fax: (62) 3533 2123  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

**Unidade responsável pelo conteúdo**

Embrapa Arroz e Feijão

Comitê Local de Publicações

Presidente

*Pedro Marques da Silva*

Secretário-executivo

*Luiz Roberto Rocha da Silva*

Membros

*Camilla Souza de Oliveira*  
*Luciene Frões Camarano de Oliveira*  
*Flávia Rabelo Barbosa Moreira*  
*Ana Lúcia Delalibera de Faria*  
*Heloisa Célis Breseghello*  
*Márcia Gonzaga de Castro Oliveira*  
*Fábio Fernandes Nolêto*

**Embrapa Informação Tecnológica**

Parque Estação Biológica (PqEB)  
Av. W3 Norte (final)  
CEP 70770-901 Brasília, DF  
Fone: (61) 3448-4236  
Fax: (61) 3448-2494  
www.embrapa.br/livraria  
livraria@embrapa.br

**Unidade responsável pela edição**

Embrapa Informação Tecnológica

Coordenação editorial

*Selma Lúcia Lira Beltrão*  
*Lucilene Maria de Andrade*  
*Nilda Maria da Cunha Sette*

Supervisão editorial

*Erika do Carmo Lima Ferreira*

Revisão de texto

*Letícia Ludwig Loder*

Normalização bibliográfica

*Celina Tomaz de Carvalho*

Projeto gráfico e editoração eletrônica

*Júlio César da Silva Delfino*

Tratamento de ilustrações

*Sebastião Araújo*

Capa

*Júlio César da Silva Delfino*

Foto da capa

*Sebastião Araújo*

**1ª edição**

1ª impressão (2015): 1.000 exemplares

**Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Informação Tecnológica

Nutrição mineral do feijoeiro / Nand Kumar Fageria ... [et al.]. – Brasília, DF : Embrapa, 2015.

394 p. : il. color. ; 16 cm x 22 cm.

ISBN 978-85-7035-431-0

1. Feijão. 2. Nutrição vegetal. 3. Produção vegetal. I. Fageria, Nand Kumar (1942-2014). II. Stone, Luís Fernando. III. Santos, Alberto Baêta dos. IV. Carvalho, Maria da Conceição Santana. V. Embrapa Arroz e Feijão.

CDD 635.652

© Embrapa 2015

## **Autores**

### **Nand Kumar Fageria (in memoriam)**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Fertilidade de Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

### **Luís Fernando Stone**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

### **Alberto Baêta dos Santos**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

### **Maria da Conceição Santana Carvalho**

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO



## Agradecimento

No dia 6 de julho de 2014, o mundo agrônomo perdeu um de seus maiores pesquisadores: Nand Kumar Fageria. Nascido em 10 de março de 1942, na cidade de Khidarsar, situada no Oeste da Índia, chegou ao Brasil em 18 de outubro de 1974 e se radicou em Goiânia, Goiás, onde iniciou suas atividades na então Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária (Emgopa). Fageria deixou esposa (Shanti Fageria), três filhos (Rajesh, Satya Pal e Savita) e três netos (Sofia, Maia e Anjit).

Graduou-se em Engenharia Agrônoma em 1965 e concluiu mestrado em Agronomia em 1967 na Agriculture University de Udaipur, na Índia, tendo sido agraciado com medalha de ouro pela colocação em 1º lugar no exame do curso. Em 1973, concluiu doutorado em Agronomia na Université Catholique de Louvain (UCL), na Bélgica. Em 1987, foi agraciado com bolsa de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e, em 1988, realizou pós-doutorado no United States Department of Agriculture (USDA-ARS), em Berkeley/Beltsville, nos Estados Unidos. Foi bolsista do Indian Council of Agriculture Research (na Índia), da UCL (na Bélgica) e, desde 1989, era bolsista de produtividade em pesquisa pelo CNPq. Também era membro de corpo editorial dos periódicos *Journal of Plant Nutrition* (desde 2001) e da *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal* (desde 2006). Além disso, contribuiu, como revisor convidado, com vários outros periódicos nacionais e internacionais.

Fageria atuava como pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) na Unidade Arroz e Feijão, sediada em Santo Antônio de Goiás, Goiás, desde 1º de julho de 1975. Nesse período, publicou 262 artigos completos em periódicos; 15 livros (em português e inglês), que foram usados como referências em âmbitos nacional e internacional; e 44 capítulos de livro. Proferiu palestras nas áreas de fertilidade do solo e nutrição de plantas no Brasil e em diversos outros países, como Estados Unidos, Canadá, Japão, Índia, China, Sri Lanka, Portugal, Austrália e Holanda.

Dedicou toda a sua vida aos estudos de fertilidade do solo e adubação, principalmente das culturas de arroz de terras altas, arroz irrigado e feijão, fazendo com que seu trabalho e suas ideias fossem transportados ao mundo todo, tornando-se, assim, um dos maiores expoentes em solos e nutrição de plantas. Como exemplo de contribuição aplicada, fruto de

tantos anos de dedicação à pesquisa na área, menciona-se o aumento na produtividade de arroz irrigado na região tropical em razão das suas recomendações de adubação.

Esta homenagem é uma manifestação pública de reconhecimento pelos inestimáveis serviços prestados ao Brasil pelo inesquecível amigo Fageria, que sempre será lembrado como exemplo de competência, conhecimento e companheirismo. Fageria dedicou-se, até os últimos dias de sua vida, com grande entusiasmo, às tarefas de contribuir para a Ciência Agrícola e atender aos estudantes de Agronomia, professores, pesquisadores, extensionistas, a toda comunidade científica e ao agronegócio brasileiro, engrandecendo o meio científico e, em especial, a Embrapa.

## Apresentação

O feijão é a leguminosa mais importante para o consumo humano e a principal fonte de proteína para muitas populações da América Latina, Caribe, Ásia e África. No Brasil, junto com o arroz, forma a base da alimentação diária.

O feijão é alimento que apresenta alto significado social, pois, além de compor a dieta básica do brasileiro, é uma espécie tradicional da agricultura familiar e emprega grande quantidade de mão de obra no campo. Além de ser uma cultura de subsistência em pequenas propriedades, é um produto de alto valor de mercado, que atrai cada vez mais a atenção da agricultura empresarial. O Brasil é o maior produtor mundial de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), e suas áreas produtoras se estendem por regiões tropicais e subtropicais. Entretanto, a produtividade média de feijão no Brasil ainda é baixa. Entre os fatores que contribuem para isso estão a baixa fertilidade e a alta acidez dos solos. O uso racional de fertilizantes e corretivos de solo é um fator muito importante na agricultura moderna, pois, além de contribuir para o aumento da produtividade e a redução do custo da produção, diminui o risco de poluição do meio ambiente.

Este livro aborda temas relevantes sobre a cultura do feijoeiro, como o manejo de nutrientes, a caracterização dos solos onde se cultiva o feijão e a fisiologia da produção. A Embrapa Arroz e Feijão enaltece o esforço dos autores e de todos aqueles que contribuíram para a elaboração deste livro. Temos a convicção de que os conhecimentos nele contidos podem contribuir para aumentar a produtividade e a sustentabilidade da cultura do feijoeiro no Brasil.

*Flávio Breseghello*

Chefe-Geral da Embrapa Arroz e Feijão



## Prefácio

A nutrição mineral é a prática de adição de adubos químicos e orgânicos no solo e sua transformação na forma de absorção e utilização pelas plantas. Esse processo é influenciado por clima, solo, plantas e suas interações. Por isso, a nutrição mineral das plantas é um assunto complexo, e seu manejo durante a produção das culturas necessita de cuidado especial. Além disso, a nutrição mineral está entre os importantes fatores tecnológicos de produção, como escolha de cultivares, disponibilidade de água, controle de doenças, pragas e plantas daninhas.

Nos últimos anos, tem-se verificado aumento dos custos dos fertilizantes, situação provavelmente irreversível graças ao reflexo dos custos mais elevados de energia, matérias-primas e transportes. Os fertilizantes passam, assim, a exigir mais investimento daqueles que se dedicam a atividades agrícolas, merecendo, portanto, atenção especial com referência ao seu uso com vistas a um melhor aproveitamento pelas culturas. Alguns dos principais fatores que determinam a produtividade das culturas são a fertilidade do solo e a nutrição mineral. A maioria dos solos onde se cultiva o feijoeiro no Brasil é ácida e apresenta baixa fertilidade.

Neste livro, são abordados, em 14 capítulos, temas relevantes sobre a cultura do feijoeiro (como o manejo de nutrientes, a caracterização dos solos onde se cultiva essa leguminosa e a fisiologia da produção). Ademais, são discutidos resultados mais recentes de pesquisa desenvolvidos na região do Cerrado, que apresenta a maior área cultivada com o feijoeiro.

Esperamos que este livro sirva como referência para professores, pesquisadores, estudantes de agronomia e extensionistas interessados nos assuntos tratados e, com isso, propicie a melhoria da produtividade do feijoeiro, a redução dos custos de produção e do impacto ambiental negativo decorrentes da atividade e a melhoria da qualidade de vida dos produtores e de suas famílias.

*Autores*





## **Sumário**

Capítulo 1 • Solos e diagnose do estado nutricional, **15**

Capítulo 2 • Fisiologia da produtividade, **41**

Capítulo 3 • Calagem, **55**

Capítulo 4 • Nitrogênio, **95**

Capítulo 5 • Fósforo, **153**

Capítulo 6 • Potássio, **191**

Capítulo 7 • Cálcio e magnésio, **215**

Capítulo 8 • Enxofre, **231**

Capítulo 9 • Zinco, **241**

Capítulo 10 • Boro, **259**

Capítulo 11 • Cobre, **281**

Capítulo 12 • Manganês, **295**

Capítulo 13 • Ferro, **309**

Capítulo 14 • Molibdênio, **323**

Referências, **335**



## Capítulo 1

# **Solos e diagnose do estado nutricional**

## INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é considerado a leguminosa mais importante para o consumo humano nos países em desenvolvimento. Em escala mundial, o feijão é a terceira cultura mais importante para nutrição humana e animal, após soja e amendoim (SINGH, 1999). Embora as leguminosas, tomadas individualmente, forneçam mais nutrientes minerais do que os cereais (WELCH et al., 2000), o feijão tem seu valor nutricional aumentado especialmente se consumido junto com cereais e outros alimentos ricos em carboidratos (FAGERIA, 2002b). É o que ocorre na América Latina, em que o feijão, junto com o arroz, compõe a dieta básica de todos os segmentos da população.

Na América Latina, o consumo de feijão fornece de 8% a 27% do potássio (K) necessário diariamente para a população (PENNINGTON; YOUNGT, 1990). O feijão contém até três vezes mais K do que a banana (LIMA et al., 2006). Beebe et al. (1993) relataram teor de K de até 21,25 g kg<sup>-1</sup> em sementes de feijão. Poersch et al. (2011) relataram teor de K na faixa de 6,0 g kg<sup>-1</sup> a 14,9 g kg<sup>-1</sup> em sementes de feijão, dependendo dos genótipos. Além disso, o feijão contém baixos teores de gordura e sódio (Na) e é livre de colesterol (HOSFIELD, 1991; MORROW, 1991). Possui altos teores de manganês (Mn), que atua como antioxidante na produção de enzimas responsáveis pela desativação de radicais livres, e de ferro (Fe), um dos componentes da hemoglobina. O alto teor de substâncias antioxidantes encontrado em feijão-preto é comparável ao encontrado na uva. Outro fator nutricional que qualifica o feijão como alimento é sua riqueza em fibras, tanto as que atuam na redução do colesterol como as que agem no combate ao diabetes (ANTUNES et al., 2007).

O feijoeiro é cultivado em diversas regiões agroclimáticas, mas sua maior concentração está em áreas de climas tropical e subtropical. Em âmbito mundial, a maior produção está nas Américas do Sul e Central, no Caribe, na Ásia e na África. A América do Norte e a Europa também cultivam o feijão, mas em menor escala. O feijão, rico em proteína (de 20% a 25%), é a principal fonte de alimento das populações das Américas do Sul e Central, do Caribe e da África. O feijão apresenta cerca de metade do teor de proteína da soja, porém é de melhor digestibilidade proteica (79%) (PIRES et al., 2006). Embora a proteína do feijão seja deficiente nos aminoácidos essenciais sulfurados metionina e cistina, fornece

quantidades adequadas de diversos aminoácidos essenciais (PIRES et al., 2006; RIBEIRO et al., 2007) e é rica em lisina e treonina (aminoácidos nos quais os cereais são deficientes), o que o qualifica como fonte de proteína de boa qualidade ou de alto valor biológico. Além disso, o feijão contém aproximadamente 2,4% de lipídeos e 75% de carboidratos. Na Tabela 1, são apresentados dados de análises químicas de sementes de diversas culturas.

O feijoeiro é cultivado em todo o território brasileiro. O Estado de Goiás e o Distrito Federal respondem por cerca de 10% da produção nacional de feijão (PEREIRA et al., 2010). Os estados do Paraná e de Santa Catarina são responsáveis por aproximadamente 35% da produção (FEIJÃO..., 2013), enquanto Minas Gerais, o segundo maior produtor de feijão do Brasil, responde por 19% (SILVA et al., 2011). Entre as culturas anuais que fazem parte da dieta da população brasileira, o feijão ocupa posição de destaque sob os pontos de vista econômico e social; o consumo médio per capita nos últimos 25 anos foi de 17,5 kg ano<sup>-1</sup> (VENCOVSKY; RAMALHO, 2006). Couto et al. (2010) também relataram que o feijão é um dos mais importantes componentes da dieta alimentar do brasileiro, com um consumo per capita superior a 17 kg ano<sup>-1</sup>.

**Tabela 1.** Teores de proteína, lipídeo e carboidrato em sementes de várias culturas.

| Cultura      | Proteína (%) | Lipídeo (%) | Carboidrato (%) |
|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| Feijão       | 19,2         | 2,4         | 75,5            |
| Arroz        | 10,5         | 2,2         | 82,8            |
| Trigo        | 11,3         | 1,7         | 82,2            |
| Cevada       | 13,2         | 3,5         | 81,3            |
| Aveia        | 12,5         | 4,7         | 80,3            |
| Milho        | 10,2         | 4,1         | 84,2            |
| Sorgo        | 8,8          | 3,5         | 84,9            |
| Soja         | 31,4         | 20,1        | 44,4            |
| Amendoim     | 19,3         | 30,4        | 48,4            |
| Grão-de-bico | 17,3         | 5,1         | 75,0            |
| Ervilha      | 23,3         | 1,5         | 72,3            |

Fonte: adaptado de Shinano et al. (1993).

O feijão é reconhecido como cultura de subsistência em pequenas propriedades, muito embora tenha atraído, nos últimos anos, crescente interesse de produtores que adotam tecnologias avançadas, incluindo a irrigação e a colheita mecanizada. Em consequência, a cultura está sujeita às mais diversas práticas de manejo e aos mais diversos ambientes, incluindo tanto o cultivo consorciado com outras espécies sem irrigação quanto o cultivo irrigado em que se utiliza alto nível tecnológico (VENCOVSKY; RAMALHO, 2006).

Embora o feijão seja um dos alimentos básicos dos brasileiros e de outros povos da América Latina, sua produtividade é baixa (Tabela 2). Entre os fatores responsáveis por isso estão a baixa fertilidade e a grande acidez dos solos, a deficiência hídrica, a suscetibilidade da cultura a doenças e pragas e o uso de baixa tecnologia pelos produtores por causa de suas condições socioeconômicas. Além disso, no Brasil, o feijoeiro é submetido a diferentes condições ambientais, pois ele é cultivado em vários estados, em diferentes épocas de semeadura (águas, seca e inverno) e sistemas de cultivo, que variam da agricultura de subsistência, com

**Tabela 2.** Área, produção e produtividade de feijão nos principais países produtores em 2008.

| País            | Área (mil ha) | Produtividade (mil t) | Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|---------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Índia           | 10.000,0      | 3.930,0               | 393,0                                |
| Brasil          | 3.780,8       | 3.460,9               | 915,4                                |
| Mianmar         | 2.350,0       | 2.500,0               | 1.063,8                              |
| Estados Unidos  | 584,9         | 1.159,3               | 1.982,2                              |
| México          | 1.505,7       | 1.122,7               | 745,7                                |
| China           | 964,8         | 1.121,2               | 1.162,0                              |
| Tanzânia        | 700,0         | 480,0                 | 685,7                                |
| Uganda          | 896,0         | 440,0                 | 491,1                                |
| Argentina       | 254,9         | 336,8                 | 1.321,3                              |
| Indonésia       | 310,0         | 320,0                 | 1.032,3                              |
| Coreia do Norte | 350,0         | 300,0                 | 857,1                                |
| Outros          | 6.291,3       | 5.224,1               | 830,4                                |
| Mundo           | 27.988,4      | 20.394,9              | 728,7                                |

Fonte: FAO (2002).

baixo uso de insumos, até a agricultura empresarial, de alta tecnologia. Nessa condição, espera-se uma interação entre genótipo e ambiente e produtividades diferentes (MELO et al., 2007; PEREIRA et al., 2009, 2010).

Em uma agricultura moderna, o uso racional de corretivos e fertilizantes é uma das premissas necessárias para o sucesso na produção. A adubação é um componente importante do sistema de produção, tanto pelo aumento de produtividade que pode proporcionar como pelo custo que representa (SOUZA, 2000). A deficiência nutricional é um fator importante, que limita a produção de culturas anuais em solos brasileiros. Considerando-se o alto custo dos fertilizantes, existem duas maneiras de minimizar o problema de estresses nutricionais: melhorar a planta, visando a sua adaptação ao solo, ou melhorar o solo para as plantas. Para melhor resultado, deve-se ter a combinação das duas estratégias. O esforço de desenvolver genótipos de culturas com tolerância a estresses nutricionais foi intensificado no período dos últimos 15 a 20 anos em várias partes do mundo, inclusive no Brasil (FAGERIA et al., 2006a).

A qualidade do solo é um dos fatores mais importantes na produção das culturas. Os índices de qualidade do solo, baseados nas suas propriedades físicas, químicas biológicas, são usados na avaliação da capacidade de produção das culturas (FAGERIA, 2002c). O objetivo deste Capítulo é discutir as propriedades dos solos (especialmente do Cerrado e de várzeas) onde se cultiva o feijoeiro e os métodos de avaliação do estado nutricional das plantas. Com base nessas informações, é possível usar adequadamente os nutrientes essenciais, aumentar a produtividade da cultura e reduzir o custo da produção e a degradação do meio ambiente.

## **SOLOS ONDE SE CULTIVA O FEIJOEIRO**

O feijoeiro é cultivado em diferentes solos nas várias partes do mundo. Porém, nas regiões tropicais e subtropicais das Américas, inclusive no Brasil, onde se concentram aproximadamente 47% da produção mundial, os solos predominantes são os Latossolos, Argissolos, Gleissolos e Cambissolos, que são ácidos, de baixa fertilidade natural e possuem elementos tóxicos, como alumínio (Al) e Mn. Na América tropical, 82% dos solos no estado natural são deficientes em macro e micronutrientes (SÁNCHEZ; SALINAS, 1981). No Brasil, o feijoeiro é principalmente cultivado em solos do bioma Cerrado. Porém, o seu cultivo, mediante o uso de subirrigação, é uma alternativa importante na



sucessão com o arroz irrigado nas várzeas tropicais, onde predominam os Plintossolos e Gleissolos (SANTOS et al., 2010). As várzeas se caracterizam por apresentarem solos aluviais e/ou hidromórficos, geralmente planos e ricos em matéria orgânica, facilmente irrigáveis por gravidade, localizados às margens de córregos, rios e vales úmidos (RASSINI et al., 1984).

O território brasileiro é caracterizado por uma grande diversidade de tipos de solo condicionados pelas diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos associados (BERNARDI et al., 2002). O bioma Cerrado ocupa área heterogênea e não contínua de 207 milhões de hectares, cobrindo cerca de um quarto de território nacional. Estende-se pelas regiões Centro-Oeste (40%), Norte (20%), Nordeste (20%) e Sudeste (20%) (SOUSA et al., 2008). Do ponto de vista de disponibilidade hidrológica, esse bioma possui grande variabilidade principalmente pelo fato de estar rodeado por diferentes ecossistemas, cujas características climáticas acabam por influenciar o regime de chuvas ao longo de sua extensão (SILVA et al., 2008).

Na região Norte, os solos são profundos, altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e saturados por Al e predominam as classes Latossolos e Argissolos. Na região Nordeste, ocorrem solos de média a alta fertilidade natural, em geral pouco profundos em decorrência de seu baixo grau de intemperismo, caracterizados nas classes dos Latossolos e Neossolos. A região Centro-Oeste é uma vasta superfície muito intemperizada pelos processos erosivos naturais, onde predominam os solos profundos, bem drenados, de baixa fertilidade natural, porém com características físicas favoráveis à mecanização agrícola; a maioria desses solos pertencente à classe dos Latossolos. Na região Sudeste, predominam os Latossolos e Argissolos bem desenvolvidos e geralmente de baixa fertilidade natural. Finalmente, na região Sul, os solos (originados principalmente de rochas basálticas e sedimentos diversos) são mais férteis do que os das outras regiões do Brasil e são distribuídos nas classes dos Latossolos, Neossolos, Argissolos e Nitossolos. Entretanto, no Paraná, maior estado brasileiro produtor de feijão-comum, a cultura se encontra quase que exclusivamente vinculada a parâmetros desfavoráveis de solos, como declividade elevada, baixa profundidade efetiva do perfil e pedregosidade. Assim, o manejo desses solos deve priorizar a sua mínima movimentação possível para preservar sua estrutura natural, proporcionar adequadas condições de armazenamento de água e, conseqüentemente, diminuir riscos de erosão (SANTOS et al., 2010).

Os Latossolos são solos muito antigos, resultantes de fortes transformações de seu material constitutivo ou oriundos de sedimentos já pré-intemperizados. Em consequência, há o predomínio, na fração argila, de minerais nos últimos estádios de intemperismo, caulinitas e óxidos de Fe e Al, sendo a fração areia também dominada por minerais altamente resistentes à decomposição (predominantemente quartzo). Em geral, os Latossolos são muito profundos, porosos, bem drenados, macios e permeáveis, de textura variável, de média a muito argilosa em função do material que lhes deu origem. Comumente, são de baixa fertilidade natural e apresentam pequeno ou quase nulo aumento de teor de argila do horizonte A para o B, pois são inexpressivos tanto a mobilização ou migração de argila ao longo do perfil de solo como o desenvolvimento de outros mecanismos de formação de solos que concorram para aumento significativo do conteúdo de argila em profundidade (COELHO et al., 2006).

### **Propriedades químicas e físicas dos solos do Cerrado**

Os solos brasileiros apresentam limitações químicas e físicas ao desenvolvimento da agropecuária. As limitações químicas são a baixa disponibilidade de macronutrientes primários, tais como nitrogênio (N), fósforo (P) e K, e secundários, tais como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), e de micronutrientes, como zinco (Zn) e cobre (Cu). Ademais, existem grandes extensões de solos ácidos com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e alto poder de fixação de P, assim como elevada acidez trocável ( $Al^{3+}$ ). Com relação às limitações físicas, há regiões com alto risco de erosão (BERNARDI et al., 2002). O feijoeiro-comum deve ser cultivado em solos livres de encharcamento, bem estruturados e livres de camada compactada até 60 cm de profundidade.

As propriedades químicas importantes do solo são pH, teor de matéria orgânica e teores de macro e micronutrientes. Alguns índices, como CTC, saturação por bases e saturação por Al, são calculados com base em dados das análises químicas e são considerados na avaliação da fertilidade do solo e na correção de acidez. Os solos do bioma Cerrado são ácidos e muito deficientes em nutrientes essenciais. A quase totalidade dos Latossolos é distrófica ácida e com baixa CTC.

Para discutir as propriedades químicas dos solos do Cerrado, são usados, como exemplo, dados de levantamento de fertilidade do solo do Estado de Mato Grosso, que é um dos mais importantes na produção

de culturas como soja, arroz de terras altas, feijão e milho e que vem tendo destaque na agricultura brasileira nos últimos anos. Um dos fatores favoráveis à agricultura nesse estado é a precipitação pluvial adequada e bem distribuída durante a primavera e o verão. No Brasil, existem aproximadamente 106 milhões de hectares de área chamada “zona favorecida” (RECOMENDAÇÕES..., 1992), localizada na região amazônica ou pré-amazônica, que inclui parte dos estados de Mato Grosso, Rondônia, Acre, Amazonas, Pará e Maranhão. Essa região se caracteriza por apresentar clima tropical, com período seco variando de 1 a 3 meses por ano, de forma que normalmente não ocorre deficiência hídrica severa para as culturas. Entretanto, os solos dessa região normalmente apresentam baixa fertilidade natural e elevada acidez (GOEDERT, 1989). Em Mato Grosso, foi feito um levantamento do estado nutricional em 43 locais, distribuídos em 33 propriedades rurais, em três municípios da região da Chapada dos Parecis. A distribuição dos pontos de amostragem foi a seguinte: 23 no Município de Diamantino, 11 no Município de Sapezal e 9 no Município de Campo Novo dos Parecis. Os resultados relativos às características químicas dos solos são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3.** pH, teor de matéria orgânica e macronutrientes e micronutrientes em amostras de solo da região da Chapada dos Parecis, Estado de Mato Grosso.

| Amostra | pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> | MO <sup>(1)</sup><br>(g dm <sup>-3</sup> ) | P                      | K  | Ca                       | Mg   | Al | Cu                     | Zn  | Fe  | Mn |
|---------|------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|----|--------------------------|------|----|------------------------|-----|-----|----|
|         |                              |                                            | (mg dm <sup>-3</sup> ) |    | (mmol dm <sup>-3</sup> ) |      |    | (mg dm <sup>-3</sup> ) |     |     |    |
| 1       | 5,5                          | 21                                         | 2,8                    | 56 | 18,9                     | 6,6  | 1  | 0,4                    | 1,3 | 50  | 4  |
| 2       | 5,6                          | 14                                         | 0,9                    | 16 | 10,8                     | 8,3  | 2  | 0,2                    | 0,4 | 99  | 4  |
| 3       | 5,5                          | 16                                         | 1,4                    | 14 | 6,3                      | 4,6  | 4  | 0,2                    | 0,4 | 131 | 5  |
| 4       | 5,6                          | 26                                         | 14,8                   | 28 | 27,0                     | 6,9  | 1  | 0,8                    | 5,6 | 47  | 5  |
| 5       | 5,6                          | 26                                         | 5,1                    | 34 | 23,4                     | 6,2  | 2  | 0,4                    | 2,5 | 47  | 4  |
| 6       | 5,7                          | 20                                         | 5,9                    | 36 | 24,3                     | 7,5  | 1  | 0,4                    | 3,6 | 44  | 4  |
| 7       | 5,3                          | 20                                         | 4,9                    | 37 | 13,5                     | 4,6  | 2  | 0,7                    | 3,6 | 55  | 4  |
| 8       | 5,7                          | 20                                         | 4,0                    | 32 | 25,2                     | 13,4 | 1  | 0,4                    | 1,8 | 57  | 7  |
| 9       | 5,8                          | 20                                         | 8,3                    | 50 | 25,2                     | 8,2  | 1  | 0,9                    | 6,3 | 52  | 7  |
| 10      | 5,2                          | 28                                         | 5,8                    | 73 | 15,3                     | 5,5  | 1  | 0,2                    | 1,4 | 56  | 13 |
| 11      | 5,5                          | 18                                         | 0,6                    | 17 | 9,0                      | 6,6  | 2  | 0,4                    | 0,3 | 74  | 2  |
| 12      | 5,2                          | 15                                         | 3,5                    | 37 | 9,9                      | 5,1  | 4  | 0,3                    | 1,4 | 53  | 7  |

Continua...

**Tabela 3.** Continuação.

| Amostra | pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> | MO <sup>(1)</sup><br>(g dm <sup>-3</sup> ) | P                      | K  | Ca                       | Mg   | Al | Cu                     | Zn  | Fe  | Mn |
|---------|------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|----|--------------------------|------|----|------------------------|-----|-----|----|
|         |                              |                                            | (mg dm <sup>-3</sup> ) |    | (mmol dm <sup>-3</sup> ) |      |    | (mg dm <sup>-3</sup> ) |     |     |    |
| 13      | 5,7                          | 20                                         | 11,5                   | 28 | 24,3                     | 10,4 | 1  | 0,5                    | 4,1 | 50  | 4  |
| 14      | 5,5                          | 22                                         | 2,6                    | 34 | 15,3                     | 8,7  | 3  | 0,6                    | 1,5 | 76  | 8  |
| 15      | 6,3                          | 24                                         | 1,9                    | 20 | 32,4                     | 24,2 | 2  | 0,4                    | 1,3 | 30  | 6  |
| 16      | 5,6                          | 22                                         | 1,2                    | 20 | 13,5                     | 9,7  | 0  | 1,0                    | 8,7 | 121 | 6  |
| 17      | 5,4                          | 22                                         | 3,9                    | 23 | 19,8                     | 7,3  | 2  | 0,6                    | 2,6 | 52  | 3  |
| 18      | 5,4                          | 20                                         | 4,9                    | 25 | 19,8                     | 8,7  | 2  | 0,5                    | 2,7 | 49  | 3  |
| 19      | 5,7                          | 22                                         | 1,2                    | 34 | 20,7                     | 8,7  | 2  | 0,7                    | 1,5 | 67  | 11 |
| 20      | 5,6                          | 23                                         | 4,1                    | 51 | 17,1                     | 8,0  | 1  | 0,6                    | 3,3 | 49  | 3  |
| 21      | 5,4                          | 20                                         | 1,8                    | 30 | 18,9                     | 8,3  | 1  | 0,7                    | 3,0 | 55  | 4  |
| 22      | 4,8                          | 23                                         | 5,5                    | 33 | 8,1                      | 2,2  | 1  | 0,5                    | 2,4 | 50  | 5  |
| 23      | 5,5                          | 17                                         | 2,3                    | 25 | 18,9                     | 10,7 | 1  | 1,0                    | 3,0 | 54  | 4  |
| 24      | 5,2                          | 24                                         | 3,1                    | 33 | 17,1                     | 7,6  | 4  | 0,8                    | 3,5 | 72  | 6  |
| 25      | 5,9                          | 24                                         | 4,8                    | 33 | 23,4                     | 10,4 | 1  | 0,7                    | 3,4 | 41  | 4  |
| 26      | 5,5                          | 23                                         | 6,5                    | 16 | 17,1                     | 5,3  | 2  | 0,6                    | 5,7 | 59  | 6  |
| 27      | 5,9                          | 16                                         | 7,0                    | 28 | 26,1                     | 9,0  | 4  | 0,6                    | 4,5 | 45  | 5  |
| 28      | 5,6                          | 15                                         | 2,6                    | 33 | 22,5                     | 11,2 | 1  | 0,6                    | 1,3 | 99  | 6  |
| 29      | 5,4                          | 19                                         | 7,4                    | 33 | 15,3                     | 6,0  | 2  | 0,7                    | 3,7 | 46  | 4  |
| 30      | 5,7                          | 16                                         | 1,8                    | 25 | 20,7                     | 12,7 | 1  | 0,3                    | 1,3 | 52  | 4  |
| 31      | 5,5                          | 20                                         | 5,9                    | 25 | 20,7                     | 7,2  | 1  | 0,3                    | 2,1 | 46  | 4  |
| 32      | 5,2                          | 20                                         | 7,9                    | 30 | 15,3                     | 5,8  | 3  | 0,5                    | 2,2 | 54  | 4  |
| 33      | 5,3                          | 12                                         | 3,0                    | 12 | 5,4                      | 4,0  | 3  | 0,2                    | 0,8 | 88  | 4  |
| 34      | 5,3                          | 26                                         | 5,4                    | 55 | 17,1                     | 7,9  | 2  | 0,3                    | 1,4 | 60  | 4  |
| 35      | 5,8                          | 31                                         | 2,6                    | 66 | 21,6                     | 17,0 | 1  | 0,3                    | 0,7 | 57  | 7  |
| 36      | 5,2                          | 27                                         | 0,6                    | 20 | 6,3                      | 5,4  | 1  | 0,2                    | 0,3 | 80  | 2  |
| 37      | 5,2                          | 23                                         | 2,5                    | 27 | 12,8                     | 5,5  | 4  | 0,5                    | 1,4 | 63  | 4  |
| 38      | 5,0                          | 30                                         | 0,9                    | 14 | 7,2                      | 4,7  | 2  | 0,3                    | 0,4 | 71  | 3  |
| 39      | 5,4                          | 8                                          | 5,4                    | 20 | 9,0                      | 5,8  | 2  | 0,2                    | 0,4 | 99  | 2  |
| 40      | 5,3                          | 27                                         | 2,6                    | 25 | 19,8                     | 7,2  | 2  | 0,7                    | 1,6 | 46  | 3  |
| 41      | 5,9                          | 30                                         | 4,9                    | 51 | 34,2                     | 16,8 | 0  | 0,6                    | 1,9 | 36  | 4  |
| 42      | 5,3                          | 29                                         | 0,9                    | 33 | 8,1                      | 6,5  | 4  | 0,4                    | 0,8 | 73  | 4  |
| 43      | 5,8                          | 27                                         | 2,6                    | 25 | 22,5                     | 13,7 | 1  | 0,7                    | 3,1 | 44  | 3  |

Continua...

**Tabela 3.** Continuação.

| Amostra           | pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub> | MO <sup>(1)</sup><br>(g dm <sup>-3</sup> ) | P                      | K    | Ca                       | Mg   | Al  | Cu                     | Zn   | Fe    | Mn   |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|------|--------------------------|------|-----|------------------------|------|-------|------|
|                   |                              |                                            | (mg dm <sup>-3</sup> ) |      | (mmol dm <sup>-3</sup> ) |      |     | (mg dm <sup>-3</sup> ) |      |       |      |
| Mínimo            | 4,8                          | 8                                          | 0,6                    | 12   | 5,4                      | 2,2  | 0   | 0,2                    | 0,3  | 30    | 2    |
| Máximo            | 6,3                          | 31                                         | 14,8                   | 73   | 34,2                     | 24,2 | 4   | 1,0                    | 8,7  | 131   | 13   |
| Média             | 5,50                         | 21,5                                       | 4,12                   | 31,6 | 17,7                     | 8,4  | 1,8 | 0,51                   | 2,40 | 61,60 | 4,79 |
| DP <sup>(2)</sup> | 0,28                         | 5,1                                        | 2,93                   | 13,7 | 7,01                     | 4,02 | 1,1 | 0,22                   | 1,81 | 21,70 | 2,17 |

<sup>(1)</sup> Matéria orgânica; <sup>(2)</sup> Desvio padrão.

Fonte: Fageria e Breseghello (2004).

**Tabela 4.** Saturação por bases, saturação por alumínio, saturação por cálcio, saturação por magnésio, saturação por potássio, relação cálcio/potássio, relação cálcio/magnésio e relação magnésio/potássio em amostras de solo da região da Chapada dos Parecis, Estado de Mato Grosso.

| Amostra | Saturação (%) |    |    |    |      | Relação |       |      |
|---------|---------------|----|----|----|------|---------|-------|------|
|         | Bases         | Al | Ca | Mg | K    | Ca/K    | Ca/Mg | Mg/K |
| 1       | 31            | 4  | 22 | 8  | 1,64 | 13      | 2,86  | 5    |
| 2       | 24            | 9  | 14 | 10 | 0,51 | 26      | 1,30  | 20   |
| 3       | 16            | 26 | 9  | 6  | 0,50 | 18      | 1,37  | 13   |
| 4       | 29            | 3  | 23 | 6  | 0,60 | 38      | 3,91  | 10   |
| 5       | 27            | 6  | 21 | 6  | 0,78 | 27      | 3,77  | 7    |
| 6       | 37            | 3  | 27 | 8  | 1,03 | 26      | 3,24  | 8    |
| 7       | 22            | 10 | 16 | 5  | 1,11 | 14      | 2,93  | 5    |
| 8       | 39            | 2  | 25 | 13 | 0,81 | 31      | 1,88  | 16   |
| 9       | 39            | 3  | 28 | 9  | 1,45 | 20      | 3,07  | 6    |
| 10      | 17            | 4  | 11 | 4  | 1,40 | 8       | 2,78  | 3    |
| 11      | 19            | 11 | 11 | 8  | 0,51 | 21      | 1,36  | 15   |
| 12      | 19            | 20 | 12 | 6  | 1,15 | 10      | 1,94  | 5    |
| 13      | 36            | 3  | 25 | 11 | 0,73 | 34      | 2,34  | 14   |
| 14      | 26            | 11 | 16 | 9  | 0,91 | 18      | 1,76  | 10   |
| 15      | 60            | 3  | 34 | 25 | 0,53 | 63      | 1,34  | 47   |
| 16      | 25            | 0  | 14 | 10 | 0,53 | 26      | 1,39  | 19   |
| 17      | 28            | 7  | 20 | 7  | 0,60 | 34      | 2,71  | 12   |
| 18      | 30            | 6  | 20 | 9  | 0,66 | 31      | 2,28  | 14   |

Continua...

**Tabela 4.** Continuação.

| Amostra           | Saturação (%) |      |      |      |      | Relação |       |      |
|-------------------|---------------|------|------|------|------|---------|-------|------|
|                   | Bases         | Al   | Ca   | Mg   | K    | Ca/K    | Ca/Mg | Mg/K |
| 19                | 32            | 6    | 22   | 9    | 0,93 | 24      | 2,38  | 10   |
| 20                | 27            | 4    | 17   | 8    | 1,32 | 13      | 2,14  | 6    |
| 21                | 33            | 3    | 22   | 10   | 0,90 | 25      | 2,28  | 11   |
| 22                | 11            | 8    | 8    | 2    | 0,85 | 10      | 3,68  | 3    |
| 23                | 35            | 3    | 22   | 12   | 0,75 | 29      | 1,77  | 17   |
| 24                | 20            | 14   | 13   | 6    | 0,64 | 20      | 2,25  | 9    |
| 25                | 34            | 3    | 23   | 10   | 0,84 | 28      | 2,25  | 12   |
| 26                | 22            | 8    | 18   | 5    | 0,40 | 42      | 3,23  | 13   |
| 27                | 47            | 10   | 34   | 12   | 0,94 | 36      | 2,90  | 13   |
| 28                | 39            | 3    | 26   | 13   | 0,96 | 27      | 2,01  | 13   |
| 29                | 27            | 8    | 18   | 7    | 1,01 | 18      | 2,55  | 7    |
| 30                | 38            | 3    | 23   | 14   | 0,71 | 32      | 1,63  | 20   |
| 31                | 30            | 3    | 21   | 7    | 0,66 | 32      | 2,88  | 11   |
| 32                | 22            | 12   | 15   | 6    | 0,76 | 20      | 2,64  | 8    |
| 33                | 16            | 24   | 9    | 7    | 0,52 | 18      | 1,35  | 13   |
| 34                | 22            | 7    | 14   | 7    | 1,17 | 12      | 2,16  | 6    |
| 35                | 31            | 2    | 17   | 13   | 1,30 | 13      | 1,27  | 10   |
| 36                | 11            | 8    | 6    | 5    | 0,48 | 12      | 1,17  | 11   |
| 37                | 16            | 18   | 11   | 5    | 0,59 | 18      | 2,29  | 8    |
| 38                | 9             | 14   | 5    | 3    | 0,25 | 20      | 1,53  | 13   |
| 39                | 21            | 12   | 13   | 8    | 0,72 | 18      | 1,55  | 11   |
| 40                | 23            | 7    | 16   | 6    | 0,53 | 31      | 2,75  | 11   |
| 41                | 50            | 0    | 33   | 16   | 1,25 | 26      | 2,04  | 13   |
| 42                | 12            | 21   | 6    | 5    | 0,67 | 10      | 1,25  | 8    |
| 43                | 34            | 3    | 21   | 12   | 0,58 | 35      | 1,64  | 21   |
| Mínimo            | 9             | 0    | 5    | 2    | 0,25 | 8       | 1,17  | 3    |
| Máximo            | 60            | 26   | 34   | 25   | 1,64 | 63      | 3,91  | 47   |
| Média             | 28            | 8    | 18   | 9    | 0,82 | 24      | 2,23  | 12   |
| DP <sup>(1)</sup> | 10,78         | 6,33 | 7,36 | 4,03 | 0,31 | 10,62   | 0,74  | 7,08 |

<sup>(1)</sup> Desvio padrão.

Fonte: Fageria e Bresgehlo (2004).

## **pH do solo e matéria orgânica**

Medições de pH podem ser usadas para prever o comportamento químico dos solos, particularmente em relação à disponibilidade de nutrientes e à presença de elementos tóxicos. Nos dados apresentados por Fageria e Breseghello (2004) a respeito da produção em Mato Grosso, o pH do solo variou de 4,8 a 6,3, com média de 5,5 (Tabela 3). O pH adequado para a cultura do feijoeiro é relatado como sendo em torno de 6,5 em solo de Cerrado (FAGERIA, 2008); portanto, a maioria das amostras analisadas possuía pH baixo para a cultura do feijoeiro. Isso significa que quase todas as propriedades rurais incluídas no estudo de Fageria e Breseghello (2004) necessitavam de calagem para aumentar o pH ao nível ideal para a cultura do feijoeiro.

A matéria orgânica exerce uma influência muito grande sobre as propriedades físicas e químicas do solo, e sua quantidade e qualidade se refletem na produtividade das culturas (FAGERIA et al., 1999). Solos pobres em matéria orgânica (de textura arenosa com concentração abaixo de 8 g kg<sup>-1</sup> ou de textura argilosa com concentração abaixo de 24 g kg<sup>-1</sup>) normalmente não propiciam alta produtividade ao feijoeiro-comum, pois o eficiente fornecimento de nutrientes para as raízes depende da quantidade de matéria orgânica no solo, que deve ser de 11 g kg<sup>-1</sup> a 15 g kg<sup>-1</sup> em solos de textura arenosa ou de 31 g kg<sup>-1</sup> a 45 g kg<sup>-1</sup> em solos de textura argilosa (SANTOS et al., 2010). O conteúdo de matéria orgânica dos solos estudados por Fageria e Breseghello (2004) variou de 8 g dm<sup>-3</sup> a 31 g dm<sup>-3</sup>, com média de 21,5 g dm<sup>-3</sup> (Tabela 3). Em média, o teor de matéria orgânica nas amostras analisadas foi razoavelmente bom, mas o pH baixo e a mineralogia de solos altamente intemperizados, como os do bioma Cerrado, que apresentam fração argila rica em óxidos, hidróxidos e óxidos-hidróxidos de Fe e Al, não permitem sua mineralização adequada, ficando a maior parte inativa (LOPES, 1983).

## **Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e alumínio**

O solo, especialmente na profundidade de 0 a 20 cm, deve apresentar teores adequados de Ca, Mg, K e P para permitir a obtenção de alta produtividade de feijão. Deve favorecer o crescimento radicular em profundidade, pois raízes mais profundas oferecem à planta melhores condições para sobreviver a veranicos que normalmente ocorrem na época chuvosa no Cerrado e em parte da região Sul do Brasil, no bioma Mata Atlântica.

A maioria dos solos tropicais apresenta altos teores de óxidos de Fe e de Al, o que propicia elevada capacidade de reter íons fosfato em formas não lábeis e, conseqüentemente, baixa disponibilidade de P. Segundo Fageria e Baligar (1996), a deficiência de P é considerada a principal limitação para a produtividade em regiões tropicais, e estima-se que mais de 50% do feijoeiro desenvolvido nessas regiões ocorra em solos deficientes em P. Entre as propriedades químicas avaliadas por Fageria e Breseghello (2004), o teor de P foi a que teve maior variação, de  $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $14,8 \text{ mg dm}^{-3}$ , com média de  $4,1 \text{ mg dm}^{-3}$  (Tabela 3). Silveira et al. (2000) também relataram alta variação no teor de P em solos do Cerrado em comparação com outros nutrientes, como K, Ca e Mg. O nível adequado de P para a cultura do feijoeiro é  $> 10 \text{ mg dm}^{-3}$  (FAGERIA et al., 1996). Isso significa que quase todas as amostras analisadas por Fageria e Breseghello (2004) eram deficientes em P e que sua aplicação seria necessária para se obter boa produtividade. A deficiência de P nos solos do Cerrado é generalizada em razão do baixo teor natural desse nutriente e da sua alta capacidade de fixação, o que resulta em baixa eficiência de recuperação do P (FAGERIA, 2006a).

O teor de K nas amostras de Fageria e Breseghello (2004) variou de  $12 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $73 \text{ mg dm}^{-3}$ , com média de  $31,6 \text{ mg dm}^{-3}$ . O nível de K considerado adequado para a cultura do feijoeiro é superior a  $50 \text{ mg dm}^{-3}$  (FAGERIA et al., 1996); portanto 84% das amostras analisadas eram deficientes em K. As respostas do feijoeiro ao K não têm sido estáveis, como as verificadas na presença de N e P.

O teor de Ca nos solos analisados por Fageria e Breseghello (2004) variou de  $5,4 \text{ mmol dm}^{-3}$  a  $34,2 \text{ mmol dm}^{-3}$ , enquanto o de Mg variou de  $2,2 \text{ mmol dm}^{-3}$  a  $24,2 \text{ mmol dm}^{-3}$ . O valor médio de Ca foi de  $17,7 \text{ mmol dm}^{-3}$  e o de Mg foi de  $8,4 \text{ mmol dm}^{-3}$ . O nível adequado de Ca para a cultura do feijoeiro é  $> 20,0 \text{ mmol dm}^{-3}$  e o de Mg é  $> 10,0 \text{ mmol dm}^{-3}$  (FAGERIA et al., 2010; RIBEIRO et al., 1999).

As raízes das plantas não se desenvolvem adequadamente em solos muito ácidos, contendo excesso de Al trocável ou teores muito baixos de Ca. A acidez pode ser decorrente da rocha de origem, da remoção das bases, de baixos teores de Ca, Mg e K, da decomposição da matéria orgânica e da absorção de nutrientes pelas plantas (BERNARDI et al., 2002). No estudo de Fageria e Breseghello (2004), o teor de Al variou de 0 a  $4 \text{ mmol dm}^{-3}$  com valor médio de  $1,8 \text{ mmol dm}^{-3}$  (Tabela 3). A cultura do feijoeiro é sensível à acidez do solo, e a produtividade diminui com



o incremento de Al no solo (FAGERIA; SANTOS, 1998b). O Al impede a absorção de P pela planta e dificulta a divisão celular das raízes. De acordo com Ribeiro et al. (1999), o nível crítico tóxico de Al, para a maioria das culturas, é atingido quando o teor desse elemento é maior do que  $10 \text{ mmol dm}^{-3}$  no solo. Portanto, os níveis de Al encontrados por Fageria e Breseghello (2004) não são prejudiciais para as culturas anuais, como o feijoeiro.

### **Cobre, zinco, ferro e manganês**

A importância dos micronutrientes na agricultura brasileira tem aumentado, nos últimos anos, graças ao cultivo intensivo dos solos, ao uso de calagem para corrigir a acidez, à erosão do solo e ao uso de cultivares modernas que necessitam de níveis mais altos de micronutrientes. Os teores de Cu nos solos de Cerrado do Estado de Mato Grosso variaram de  $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , com média de  $0,51 \text{ mg dm}^{-3}$  (Tabela 3). O nível adequado de micronutrientes depende do pH do solo e do extrator utilizado. No caso do Cu, situa-se na faixa de  $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $3 \text{ mg dm}^{-3}$ , em solo do Cerrado, para as culturas anuais, utilizando o extrator Mehlich 1 e pH na faixa de 5,5 a 6,0 (FAGERIA, 1998a). Baseando-se no limite mínimo, Fageria e Breseghello (2004) constataram que 44% dos pontos avaliados eram deficientes em Cu. Por outro lado, considerando o limite superior, todos os pontos eram deficientes nesse micronutriente.

Nos dados de Fageria e Breseghello (2004), o teor de Zn variou de  $0,3 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $8,7 \text{ mg dm}^{-3}$ , com valor médio de  $2,4 \text{ mg dm}^{-3}$ . Cox (1987) e Martens e Lindsay (1990) fizeram revisões de literatura sobre os níveis críticos de Zn em vários solos e culturas e relataram que eles variaram de extrator para extrator e de cultura para cultura. Esses autores atestam, ainda, que os níveis críticos de Zn estão na faixa de  $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $3 \text{ mg dm}^{-3}$  de solo para as culturas de arroz, feijão, milho e soja pelo extrator Mehlich 1. Fageria (2000b) relatou que os níveis de Zn no solo do Cerrado variaram de  $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $5 \text{ mg dm}^{-3}$ , pelo extrator Mehlich 1, para as culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo. Ainda, Fageria (1998) relatou que o nível adequado de Zn em solo do Cerrado para o desenvolvimento normal da planta de feijão está na faixa de  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $3 \text{ mg dm}^{-3}$ . Levando-se em consideração o valor de Zn de  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  do solo, observa-se que 21% das amostras analisadas são deficientes em Zn.

O valor adequado de Fe para culturas anuais está na faixa de  $5 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ , e o de Mn está entre  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $8 \text{ mg dm}^{-3}$ , pelo extrator Mehlich 1, em solo do Cerrado (FAGERIA, 1998b). As amostras analisadas por Fageria e Breseghello (2004) continham suficiente Fe, mas 21% das amostras apresentaram nível de Mn abaixo de  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  do solo, ou seja, um nível inadequado. Outras 18 amostras apresentaram Mn igual a  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  do solo, ou seja, um valor crítico. Se se considerar as amostras com níveis de calagem e produção insuficientes nesse bioma, a porcentagem de amostras deficientes sobe para 63%, o que coloca o Mn como uma das maiores preocupações nesses solos.

### **Saturação por bases, saturações por alumínio, cálcio, magnésio e potássio e relações cálcio/potássio, cálcio/magnésio e magnésio/potássio**

A porcentagem de saturação por bases na CTC da maioria dos Latossolos é inferior a 50%, o que caracteriza solos distróficos. Conforme Fageria e Breseghello (2004), os valores de saturação por bases nos solos da região da Chapada dos Parecis, MT, variaram de 9% a 60%, com média de 28% (Tabela 4). O percentual adequado de saturação por bases para a cultura do feijoeiro relatada por vários autores situa-se na faixa de 60% a 70% (FAGERIA, et al., 2008, 2010). Para as outras culturas da rotação (soja e milho), a faixa é de 50% a 70% em solo do Cerrado (FAGERIA; STONE, 1999). Levando-se em consideração o limite  $> 60\%$  para o feijoeiro, a maioria das amostras apresenta baixa saturação por bases. Em geral, os Latossolos apresentam saturação por Al maior do que 50%, que, aliada aos baixos teores de Ca, determina restrições para o crescimento das raízes de muitas plantas cultivadas. Com relação à saturação por Al, Fageria e Breseghello (2004) observaram que os valores oscilaram de 0 a 26%, com valor médio de 7,8%. O nível crítico tóxico de saturação por Al é de 70% para arroz de terras altas, 15% para soja, 19% para milho e 10% para o feijoeiro em solo do Cerrado (FAGERIA; STONE, 1999). A maioria das amostras de Fageria e Breseghello (2004) apresentou baixa saturação por Al quando se consideram culturas mais suscetíveis (Tabela 4).

Conforme os dados de Fageria e Breseghello (2004), os valores de saturação por Ca variaram de 5% a 34%, os de saturação por Mg de 2% a 25% e os de saturação por K de 0,25% a 1,64%. A relação Ca/K variou de 8 a 63, a relação de Ca/Mg de 1,17 a 3,91 e a relação de Mg/K de 3 a

47 (Tabela 4). São escassas as informações sobre os níveis adequados de saturação por Ca, Mg e K e as relações entre Ca/K, Ca/Mg e Mg/K para a produção de culturas como feijão, milho e soja em solo do bioma Cerrado. Entretanto, Kamprath (1984) relata o nível adequado de saturação por Ca na faixa de 25% a 30% em solos tropicais ácidos e intemperizados, como os do Cerrado. Camberato (1999) afirma que, geralmente, saturação por Mg maior do que 10% é necessária para assegurar fornecimento desse nutriente para culturas anuais. Eckert (1987) relata que o nível adequado de saturação por K está na faixa de 2% a 5%. Isso significa que 81% das amostras de Fageria e Breseghello (2004) são deficientes em saturação por Ca, 67% são deficientes em saturação por Mg e 100% são deficientes em saturação por K.

Liebhardt (1981) considera valor em torno de 5 como nível adequado da relação Ca/K para culturas anuais e, com base nesse critério, observou-se que todas as amostras de Fageria e Breseghello (2004) tinham relação Ca/K bastante alta, o que indica que o teor de K é baixo em relação ao de Ca e que existe um desequilíbrio nesses solos. Cochrane (1989) menciona o valor de 2 para a relação Ca/Mg como nível adequado em solo do bioma Cerrado. Com base nesse critério, constata-se que 40% de amostras analisadas por Fageria e Breseghello (2004) estão abaixo do limite. Para a relação Mg/K, Rosolem et al. (1984) propõem que valor maior do que 0,6 seria adequado em Latossolos brasileiros, enquanto Lierop et al. (1979) e Rahmatullah e Baker (1981) propõem um valor em torno de 0,5 para vários tipos de solos e culturas. Com base nesse critério, os valores na maioria das amostras de Fageria e Breseghello (2004) são bastante altos, o que significa desequilíbrio entre Mg e K.

### **Areia, silte e argila**

Os solos da região do Cerrado variam largamente na sua composição textural. Mendes (1972), analisando 1.200 amostras desses solos, verificou que 88% delas compreendem quatro grupos texturais: francoarenoso, argiloso, francoargiloarenoso e francoargiloso. Na Tabela 5, é apresentada a composição granulométrica de duas classes de solos representativas do Cerrado. De acordo com os resultados dessas análises, verifica-se que o Latossolo Vermelho é mais argiloso do que o Latossolo Vermelho-Amarelo. Os principais componentes granulométricos são argila e areia. O teor de argila variou de 290 g kg<sup>-1</sup> a 480 g kg<sup>-1</sup> e o de silte apresentou-se relativamente constante (para quaisquer combinações

entre argila e areia), situando-se entre  $90 \text{ g kg}^{-1}$  e  $190 \text{ g kg}^{-1}$ . Em razão de sua estrutura, a capacidade de retenção de água disponível é pequena, mesmo nos solos argilosos.

**Tabela 5.** Composição granulométrica de um Latossolo Vermelho e de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado.

| Profundidade (cm)                 | Areia ( $\text{g kg}^{-1}$ ) | Silte ( $\text{g kg}^{-1}$ ) | Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ) |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| <b>Latossolo Vermelho</b>         |                              |                              |                               |
| 0–10                              | 360                          | 190                          | 450                           |
| 10–35                             | 330                          | 190                          | 480                           |
| 35–70                             | 350                          | 180                          | 470                           |
| 70–150                            | 350                          | 180                          | 470                           |
| <b>Latossolo Vermelho-Amarelo</b> |                              |                              |                               |
| 0–20                              | 600                          | 90                           | 310                           |
| 20–40                             | 540                          | 120                          | 340                           |
| 100–120                           | 550                          | 160                          | 290                           |

Fonte: adaptado de Embrapa (1976).

## Propriedades químicas e físicas de solos de várzeas

As várzeas caracterizam-se por apresentar solos planos, comumente formados em condições de excesso de água ou sujeitos a inundações periódicas, o que lhes confere condições especiais, diferentes das dos solos de terras altas no que diz respeito aos atributos químicos, físicos e biológicos. No País, existem cerca de 35 milhões de hectares de várzeas e, por causa de sua maior estabilidade, esse ecossistema é suscetível ao uso de alta tecnologia. Embora, no Brasil, o potencial de várzea seja grande, a maioria ainda não é utilizada para produção de culturas anuais. Os solos de várzea desenvolvem-se sobre materiais de origens bastante distintas e são formados em diferentes graus de hidromorfismo (excesso de água). Em consequência, apresentam grande variação vertical (no perfil) e horizontal (na paisagem) das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, o que determina seu agrupamento em diferentes Ordens de solos, com diferentes limitações e aptidões de uso. Os solos predominantes nas várzeas tropicais são os Gleissolos, que compreendem solos hidromórficos, isso é, formados sob grande influência do excesso de

umidade, permanente ou temporária. Caracterizam-se por apresentar um horizonte com cores cinzentas ou neutras (horizonte glei) que, em geral, inicia-se dentro de 50 cm da superfície do solo ou imediatamente abaixo de um horizonte A. Os Gleissolos ocupam, geralmente, as depressões da paisagem e, como tal, estão permanente ou temporariamente encharcados, salvo se artificialmente drenados. Em geral, desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfismo, como as várzeas e baixadas (COELHO et al., 2006). Assim, situam-se indiscriminadamente em todas as áreas úmidas do território brasileiro, onde o lençol freático fica elevado durante a maior parte do ano (COELHO et al., 2002).

As propriedades químicas e as composições granulométricas dos solos são associadas com sua capacidade de fornecer os nutrientes, reter a água e possibilitar atividades microbiológicas e, conseqüentemente, com a produtividade das culturas. Portanto, o conhecimento das propriedades químicas e das composições granulométricas dos solos de várzea é importante para adoção de práticas de manejo da fertilidade, irrigação e drenagem e para obtenção de altos níveis de produtividade. Dessa maneira, é possível reduzir o custo de produção e proporcionar menor degradação dos solos e do meio ambiente. A caracterização química e granulométrica de solos de várzeas de alguns estados brasileiros, como Goiás, Tocantins, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Piauí, Maranhão, Paraná, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, foi feita por Fageria et al. (1991b, 1994a, 1997c) e, no Rio Grande do Sul, foi feita por Klamt et al. (1985).

### **pH do solo e matéria orgânica**

O pH é uma importante propriedade química do solo, particularmente em relação à disponibilidade de nutrientes e à presença de elementos tóxicos. Nos estudos de Fageria et al. (1991b, 1994a, 1997c) e de Klamt et al. (1985), o pH médio na camada superficial (de 0 a 20 cm) dos solos foi de 5,3 e, em média, aumentou com a profundidade. O grau de acidez do solo está descrito, quantitativamente, como ligeiramente ácido (pH entre 6 e 7), moderadamente ácido (pH entre 5,5 e 6), fortemente ácido (pH entre 5 e 5,5), muito ácido (pH 4,5 e 5) e extremamente ácido (pH menor do que 4,5) (FAGERIA et al., 1999). Isso significa que a maioria dos solos de várzea analisados é fortemente ácida até 40 cm de

profundidade e necessita de calagem para aumentar a produtividade das culturas, principalmente das leguminosas.

A matéria orgânica afeta os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Conhecer sua composição é fundamental para o manejo apropriado na produção agrícola e, por esse motivo, tem sido utilizada como indicador da qualidade do solo (MIELNICZUK, 2008; NASCIMENTO et al., 2009; VEZZANI, 2001). Nos estudos sobre solos no território brasileiro, o conteúdo médio de matéria orgânica foi de 42 g kg<sup>-1</sup> na camada de 0 e 20 cm; 22 g kg<sup>-1</sup> nas camadas de 20 cm a 40 cm e de 40 cm a 60 cm; e 9 g kg<sup>-1</sup> na camada de 60 cm a 80 cm de profundidade (FAGERIA et al., 1991a, 1994a, 1997c). Em geral, a matéria orgânica diminui com a profundidade do solo. O teor médio de matéria orgânica da camada superficial de amostras de solo de oito locais do Rio Grande do Sul foi de 41 g kg<sup>-1</sup> (KLAMT et al., 1985). Porém, Parfitt et al. (2009) relataram que o teor médio de matéria orgânica em 31 amostras de solo foi de 2,09 g kg<sup>-1</sup>. Cochrane et al. (1985), ao fazer um levantamento das terras de baixada da América Tropical, assim classificaram esses solos, em termos de matéria orgânica: teor alto quando houver > 45 g kg<sup>-1</sup> (4,5%) de matéria orgânica; teor médio quando houver de 15 g kg<sup>-1</sup> a 45 g kg<sup>-1</sup> (1,5% a 4,5%) de matéria orgânica; e teor baixo quando houver < 15 g kg<sup>-1</sup> (1,5%) de matéria orgânica. De acordo com essa classificação, 38% dos solos na camada superficial (de 0 a 20 cm) tinham alto teor de matéria orgânica, e o restante tinha níveis médio ou baixo (FAGERIA et al., 1991a, 1994a, 1997c). No Rio Grande do Sul, dos oito locais analisados, somente três tinham teores de matéria orgânica altos.

### **Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e alumínio**

O extrator Mehlich 1 e a resina de troca aniônica são os métodos mais utilizados pelos laboratórios de análises de solos do Brasil para avaliar a disponibilidade de P para as culturas (GONÇALVES; MEURER, 2008). Os valores médios de P variaram de 19,8 mg kg<sup>-1</sup> na camada superficial (de 0 a 20 cm) a 13,8 mg kg<sup>-1</sup> na camada mais profunda (de 60 cm a 80 cm). Fageria e Santos (1998b) fizeram calibração de análise de solo de várzea para produção de feijoeiro e assim classificaram os teores de P: muito baixo (de 0 a 5,3 mg kg<sup>-1</sup>), baixo (de 5,3 mg kg<sup>-1</sup> a 7,1 mg kg<sup>-1</sup>), médio (de 7,1 mg kg<sup>-1</sup> a 9,0 mg kg<sup>-1</sup>) e alto (> 9,0 mg kg<sup>-1</sup>). De acordo com essa classificação, todos os perfis dos solos tinham alto teor de P para a produção de feijoeiro.

A maioria das culturas não responde à adubação quando o teor de K é maior do que  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  no solo, o teor de Ca é maior do que  $2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e o teor de Mg é maior do que  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Isso significa que os solos de várzea analisados por Fageria et al. (1991b, 1994a, 1997c) tinham esses elementos em níveis suficientes de K para a produção de culturas anuais até 80 cm de profundidade. Em geral, os teores de P, K e Ca diminuíram com a profundidade do solo. Em média, o teor de Al variou de  $1,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  na camada mais profunda (de 60 cm a 80 cm) a  $1,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  na camada de 40 cm a 60 cm de profundidade. Considerando apenas o teor de Al, cerca de  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  é considerado tóxico para a maioria das culturas (LOPES; COX, 1977). Portanto, em média, todos os solos analisados possuíam teores altos de Al para as culturas, principalmente para as leguminosas.

### **Cobre, zinco, ferro e manganês**

Os valores desses micronutrientes variaram consideravelmente nas amostras analisadas por Fageria et al. (1991a, 1994a, 1997c). Parfitt et al. (2009) relataram teor de Mn de  $12,23 \text{ mg kg}^{-1}$ , teor de B de  $0,33 \text{ mg kg}^{-1}$ , teor de Cu de  $1,26 \text{ mg kg}^{-1}$  e teor de Zn de  $1,09 \text{ mg kg}^{-1}$  nos Gleissolos do Rio Grande do Sul.

Do ponto de vista de fertilidade, todos os nutrientes estavam em concentrações adequadas para a produção das culturas, inclusive do feijoeiro. Em poucas amostras, o teor de Zn se encontrava no nível crítico, chegando a cerca de  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  (FAGERIA, 1989b).

### **Saturação por bases, saturação por alumínio e capacidade de troca de cátions**

A saturação por bases pode ser definida como a proporção da CTC que envolve bases trocáveis, que são K, Ca, Mg e Na. Baixa porcentagem de saturação por bases significa uma predominância de hidrogênio (H) e Al no complexo de troca. Deficiências de Ca, Mg e K ocorrem, comumente, em solos com baixa CTC e baixa saturação por bases. Taxa de 50% a 60% da saturação por bases é considerada adequada para a maioria dos cereais, e taxa de 60% a 70% é adequada para a maioria das leguminosas (FAGERIA, 1989). De acordo com o critério acima, a maioria das amostras dos solos de várzea analisadas por Fageria et al. (1991b, 1994a, 1997c) tinha baixos teores de saturação por bases. Isso significa

que alguns desses solos precisavam de calagem para uma boa produção das culturas.

A saturação por Al é considerada um dos melhores índices de toxidez de Al nos solos tropicais (COCHRANE, 1989). Os valores de aproximadamente 10% para feijão, 20% para soja e sorgo, de 25% a 30% para milho e 70% para o arroz são considerados tóxicos (FAGERIA et al., 1997a). Portanto, a maioria das amostras de solos de várzea analisadas por Fageria et al. (1991b, 1994a, 1997c) possui alto valor de saturação por Al para a maioria das culturas.

O número total de cátions trocáveis que um solo pode reter é chamado CTC. Quanto mais alta a CTC de um solo, mais cátions ele pode reter. Os principais fatores que afetam a CTC do solo são a textura, a quantidade e o tipo de argila e o teor de matéria orgânica. A CTC pode ser classificada como baixa (menor do que  $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), moderadamente baixa (de  $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  a  $20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), moderadamente alta (de  $20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  a  $30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), alta (de  $30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  a  $50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) e muito alta (maior do que  $50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) (FAGERIA et al., 1999). Essa é uma classificação aproximada, que pode ser considerada como referência. De acordo com esse critério, a maioria das amostras analisadas por Fageria et al. (1991b, 1994a, 1997c) tinha CTC moderadamente alta na camada superficial do solo.

### **Areia, silte e argila**

Na profundidade de 0 a 20 cm do solo, os teores médios foram de  $354 \text{ g kg}^{-1}$  de areia,  $272 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $374 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (FAGERIA et al., 1991b, 1994a, 1997c). Nos solos de várzeas do Estado do Rio Grande do Sul, os valores médios foram de  $470 \text{ g kg}^{-1}$  de areia,  $246 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $284 \text{ g kg}^{-1}$  de argila. De acordo com Ribeiro et al. (1999), solos arenosos possuem < 15% de argila; solos de textura média contêm de 15% a 35% de argila; solos argilosos contêm de 35% a 60% de argila; e solos muito argilosos contêm > 60% de argila. Isso significa que a maioria dos solos de várzea é argilosa.

## **DIAGNOSE DO ESTADO NUTRICIONAL**

A nutrição mineral é definida como o fornecimento, a translocção, a absorção e a utilização de compostos químicos necessários para o crescimento das plantas (FAGERIA et al., 1999). Para o desenvolvimento



normal da planta, são necessários 17 nutrientes: carbono (C), H, oxigênio (O), N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Fe, Mn, boro (B), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e níquel (Ni) (FAGERIA; BALIGAR, 2005a; FAGERIA et al., 1997a, 2002). Os métodos mais usados na avaliação do estado nutricional da planta são sintomas visuais de deficiência ou toxidez e análise química da planta.

Pelo critério da essencialidade, cada nutriente desempenha funções definidas dentro da planta, e nenhum pode ser substituído por outro. Todos os nutrientes essenciais devem estar presentes na forma e quantidade adequadas para produzir resultados satisfatórios. Os cátions ou ânions podem ser absorvidos de forma independente e não necessariamente em quantidades iguais. A eletroneutralidade deve ser mantida dentro de limites razoáveis na planta e no meio de crescimento. Portanto, a relação iônica possui importância especial para a nutrição de plantas. As principais formas de absorção e funções de macro e micronutrientes são apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6.** Formas de absorção e funções dos macronutrientes e micronutrientes na planta.

| Nutriente      | Forma de absorção                                                            | Função                                                                                                                         |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Carbono (C)    | CO <sub>2</sub>                                                              | Componente básico de carboidratos, proteínas, lipídios e ácido nucleico                                                        |
| Hidrogênio (H) | H <sub>2</sub> O                                                             | Elemento que mantém o balanço iônico, é o principal agente redutor e fornecedor de energia para células                        |
| Oxigênio (O)   | H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>                                             | Elemento que faz parte dos compostos orgânicos da planta                                                                       |
| Nitrogênio (N) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>                  | Componente da clorofila e que leva ao aumento do número de panículas e do número de grãos                                      |
| Fósforo (P)    | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Elemento que promove a transferência de energia e o metabolismo de proteínas na planta                                         |
| Potássio (K)   | K <sup>+</sup>                                                               | Elemento auxiliar na regulação iônica e osmótica, na regulação de muitas enzimas de carboidratos e no metabolismo de proteínas |
| Cálcio (Ca)    | Ca <sup>2+</sup>                                                             | Elemento envolvido na divisão das células, na manutenção da integridade de membranas e na neutralização de ácidos tóxicos      |

Continua...

**Tabela 6.** Continuação.

| Nutriente       | Forma de absorção     | Função                                                                                                                                                  |
|-----------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Magnésio (Mg)   | $Mg^{2+}$             | Componente da clorofila e ativador de diversas reações enzimáticas                                                                                      |
| Enxofre (S)     | $SO_4^{2-}$           | Elemento envolvido em reações energéticas nas células da planta                                                                                         |
| Ferro (Fe)      | $Fe^{2+}$ , $Fe^{3+}$ | Ativador de diversas enzimas, que entram em reações na planta, como formação da clorofila, transporte de elétrons na fotossíntese e síntese de proteína |
| Zinco (Zn)      | $Zn^{2+}$             | Componente de várias enzimas                                                                                                                            |
| Manganês (Mn)   | $Mn^{2+}$             | Transportador de elétrons na fotossíntese e elemento essencial na formação da clorofila                                                                 |
| Cobre (Cu)      | $Cu^{2+}$             | Ativador de enzimas de oxirredução                                                                                                                      |
| Boro (B)        | $B(OH)_3^0$           | Elemento essencial para formação das células e ativador de certas enzimas                                                                               |
| Molibdênio (Mo) | Mo                    | Elemento diretamente relacionado ao metabolismo do N                                                                                                    |
| Cloro (Cl)      | $Cl^-$                | Elemento essencial para a fotossíntese e ativador de enzimas                                                                                            |
| Níquel (Ni)     | $Ni^{2+}$             | Redutor da toxidez de ureia nas plantas                                                                                                                 |

Fonte: Fageria e Baligar (2005b) e Fageria et al. (1997a).

## Sintomas visuais das deficiências

Quando o teor de um determinado nutriente é baixo no solo, as plantas não podem absorvê-lo em quantidades suficientes para o seu crescimento normal. Assim, aparecem alguns sintomas de deficiência, os quais podem estar relacionados com a redução da altura da planta, dos ramos e do crescimento das raízes e com a descoloração das folhas (FAGERIA et al., 2006a). Os sintomas de deficiência ou toxidez geralmente estão relacionados à clorose e necrose das folhas. A mobilidade do nutriente dentro da planta e a posição das folhas que sofrem deficiência estão interligadas. Para nutrientes de baixa mobilidade, como Fe, B, Cu, Ca e S, os sintomas aparecem primeiramente nas folhas superiores ou mais novas. Por outro lado, para nutrientes com mais mobilidade, como N, P, K e Mg, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas mais velhas.

Há dois tipos de clorose: a internerval e a uniforme em toda a folha. A deficiência de Fe, Mn e Mg provoca clorose internerval; a deficiência de N e de S provoca clorose uniforme em todas as partes da folha. Os sintomas de toxidez nutricional geralmente aparecem nas folhas mais velhas, onde o elemento absorvido se acumula em maior quantidade. As fotografias coloridas com sintomas de deficiência nas plantas de feijoeiro são apresentadas nos capítulos relacionados a cada nutriente.

## **Análise de plantas**

A análise da planta (ou, mais especificamente, a análise química quantitativa de uma planta ou parte dela) fornece um valor integrado de todos os fatores que influenciam a composição da planta no momento da amostragem. A ideia básica do uso da análise de plantas é que o elemento essencial para o crescimento esteja presente na planta a uma concentração suficiente. Comparando-se a concentração de um dado nutriente na planta com seu nível crítico, previamente estabelecido, pode-se determinar o estado nutricional dessa planta. Plantas que apresentam concentração acima do nível crítico são consideradas supridas, enquanto as que apresentam concentração abaixo do nível crítico são consideradas deficientes (FAGERIA, 1984; FAGERIA et al., 1999).

## **Necessidade de nutrientes para o feijoeiro baseada na acumulação nas plantas**

A acumulação de nutrientes na planta é determinada pela multiplicação do teor na planta pela massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos. Com o conhecimento do valor de acumulação de nutrientes na planta, é possível determinar a quantidade de nutrientes necessária para produzir uma determinada quantidade de grãos. As quantidades de nutrientes necessárias para produzir 1 tonelada de grãos de feijão são apresentadas na Tabela 7. A eficiência de uso de N foi de 27,4 kg grãos produzidos por kg de N acumulado na planta do feijoeiro. Da mesma maneira, a eficiência de uso de P foi de 238,2 kg de grãos produzidos por kg de P acumulado na parte aérea e nos grãos do feijoeiro. Entre os macronutrientes, o que resultou em mais eficiência na produção de grãos foi o Mg seguido pelo P. Entre os micronutrientes, os que resultaram em mais eficiência na produção de grãos foram, na ordem, Cu > Mn > Zn > Fe. Para produzir 1 tonelada de grãos, a necessidade de N foi maior e a necessidade de Mg foi menor entre os macronutrientes.

Entre os micronutrientes, para produzir 1 tonelada de grãos, a eficiência de Fe foi a maior e a de Cu foi a menor.

**Tabela 7.** Eficiência no uso de nutrientes pelo feijoeiro cultivado em solo do bioma Cerrado.

| Nutriente | Eficiência no uso <sup>(1)</sup><br>(kg kg <sup>-1</sup> ou kg g <sup>-1</sup> ) | Necessidade para<br>produzir 1 t <sup>(2)</sup> (kg ou g) | Exportação para os<br>grãos (% do total<br>acumulado) |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| N         | 27,4                                                                             | 36,5                                                      | 88                                                    |
| P         | 238,2                                                                            | 4,2                                                       | 90                                                    |
| K         | 36,7                                                                             | 27,2                                                      | 61                                                    |
| Ca        | 126,5                                                                            | 7,9                                                       | 28                                                    |
| Mg        | 255,5                                                                            | 3,9                                                       | 41                                                    |
| Zn        | 20,9                                                                             | 48,0                                                      | 67                                                    |
| Cu        | 88,1                                                                             | 11,4                                                      | 79                                                    |
| Mn        | 48,4                                                                             | 20,7                                                      | 61                                                    |
| Fe        | 3,0                                                                              | 333,1                                                     | 21                                                    |

<sup>(1)</sup> Eficiência no uso é a produção de grãos em quilograma dividida pela acumulação de nutriente na parte aérea e nos grãos. A acumulação de macronutrientes é dada em quilograma, e a acumulação de micronutrientes é dada em grama.

<sup>(2)</sup> A necessidade de macronutrientes é dada em quilograma e a de micronutrientes é dada em grama.

Fonte: Fageria et al. (2007).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O feijoeiro-comum é uma cultura importante na América Latina sob os pontos de vista social e econômico. O Brasil é o maior produtor e consumidor dessa leguminosa. A baixa produtividade do feijoeiro no Brasil (em torno de 900 kg ha<sup>-1</sup>) está associada com estresses bióticos e abióticos. A maior parte do feijoeiro é cultivada em solos aeróbicos, como os do Cerrado. Porém, recentemente, com o desenvolvimento de tecnologia, o feijoeiro passou a ser cultivado em solos de várzeas com subirrigação. Tanto os solos do Cerrado como os de várzeas são ácidos e deficientes nos principais nutrientes essenciais para as plantas. Com isso, o uso de adubação e calagem torna-se fundamental para aumentar a

produtividade e reduzir o custo de produção e a degradação do meio ambiente. A quantidade de nutrientes acumulada para produzir uma tonelada de grãos de feijão está nas seguintes ordens:  $N > K > Ca > P > Mg$  para macronutrientes e  $Fe > Zn > Mn > Cu$  para micronutrientes. A maior parte de N, P e K é exportada para os grãos, o que significa que esses nutrientes precisam ser aplicados no solo periodicamente para manter ou sustentar a produtividade da cultura a longo prazo.

## **Capítulo 2**

# **Fisiologia da produtividade**

## INTRODUÇÃO

O conhecimento da fisiologia da produtividade é importante para entender o processo de formação de seus componentes durante o ciclo das culturas. Com isso, é possível adotar medidas ou práticas apropriadas de manejo para melhorar o processo produtivo das culturas. A formação da produtividade é bastante complexa por ser influenciada por vários fatores como clima, solo e planta. A situação pode ser ainda mais complexa graças às interações entre esses fatores ambientais. Muitos processos fisiológicos que controlam a produtividade variam de genótipo para genótipo (KELLY et al., 1999). Porém, o conhecimento da base fisiológica da produtividade de qualquer cultura pode, com modificações, ser usado para avaliar outras culturas (WALLACE et al., 1972). O feijoeiro-comum é uma cultura muito sensível aos estresses bióticos e abióticos. Entre os estresses abióticos estão temperatura, disponibilidade de água, fertilidade do solo e radiação solar. Os estresses bióticos envolvem doenças e pragas, plantas daninhas e microrganismos do solo.

A produtividade das culturas está associada com várias características morfológicas e com seus componentes. As características morfológicas do feijão associadas com a produtividade incluem altura, massa da matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes e área foliar. Os componentes da produtividade são número de vagens por planta ou por unidade de área, massa de 100 sementes e número de sementes por vagem (FAGERIA et al., 2006). Além disso, o índice de colheita de grãos e o índice de colheita de nitrogênio (N) são positivamente associados com a produtividade do feijoeiro (FAGERIA et al., 2006; FAGERIA; SANTOS, 2008).

Este Capítulo tem como objetivo discutir a fisiologia da produtividade do feijoeiro.

## CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO

Ocorrem várias mudanças morfológicas durante o ciclo da cultura, desde a germinação até a maturação fisiológica. O ciclo do feijoeiro varia de 65 a 110 dias, dependendo das cultivares e das condições ambientais. Ele é dividido em duas fases principais: fase vegetativa e fase reprodutiva. Durante a fase vegetativa, ocorre o desenvolvimento do sistema radicular, das folhas trifolioladas, dos nós e dos ramos. A fase reprodutiva está mais associada com a floração, a formação de vagens e o enchimento de grãos. A MSPA está associada com a produtividade do feijoeiro e com a

absorção e acumulação de nutrientes. Desse modo, é importante mensurar a acumulação de matéria seca durante o ciclo da cultura. As fases de desenvolvimento da cultivar de feijão Pérola em solo de Cerrado na área experimental da Fazenda Capivara da Embrapa Arroz e Feijão são ilustradas na Figura 1. A cultivar completou seu ciclo (da semeadura até a maturação fisiológica) em 97 dias. Houve aumento significativo (97% de variabilidade) da MSPA com o avanço da idade da planta até aos 78 dias, sendo que, aproximadamente até aos 60 dias, o aumento foi linear, o que está relacionado com o aumento do tamanho das folhas e ramos e da massa do caule. A diminuição da MSPA após 78 dias de idade está associada com a queda de folhas e com a translocação de produto fotosintético para a formação de vagens e grãos.

Em cultivares com ciclo de 97 dias (da semeadura até a maturação fisiológica), a floração começa aproximadamente 43 dias após a semeadura, a formação de vagens aos 45 dias, e o enchimento de grãos aos 65 dias, sob condições ambientais normais (TANAKA; FUJITA, 1979).

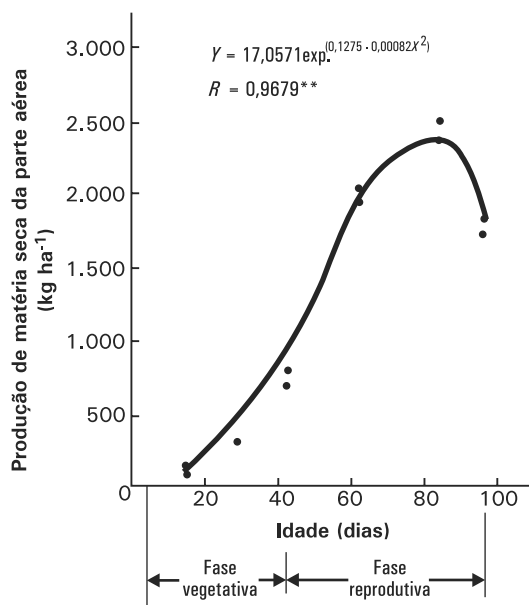


**Figura 1.** Relação entre idade da planta e matéria seca da parte aérea (MSPA) de feijão.

**\*\***Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2008).



## RELAÇÃO ENTRE MASSA DA MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA E PRODUTIVIDADE

A produtividade das culturas anuais, inclusive do feijoeiro, depende da MSPA (FAGERIA; BALIGAR, 2005a; LOPEZ BELLIDO et al., 2003). Reynolds et al. (1994) também relataram que a produtividade das culturas é positivamente associada com a MSPA. Conforme dados de Fageria et al. (2004), a produtividade de grãos do feijoeiro aumentou significativamente de forma quadrática com o aumento de MSPA (Figura 2). A produtividade máxima de 3.200 kg ha<sup>-1</sup> foi obtida com a produção de 2.098 kg ha<sup>-1</sup> de MSPA.

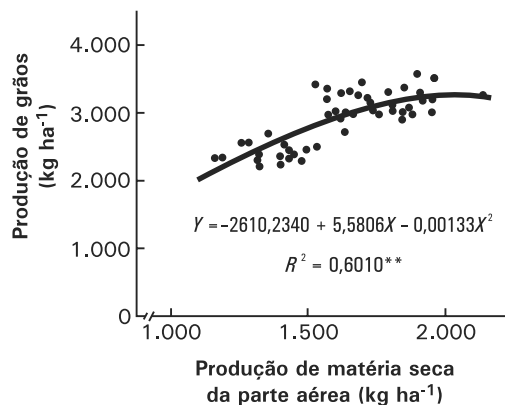


**Figura 2.** Relação entre a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e produtividade de grãos de feijão.

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2008).

O aumento da MSPA é característica de cada cultivar e pode resultar do manejo da cultura, o que inclui adubação adequada, manutenção de população apropriada de plantas e controle de doenças, pragas e plantas daninhas. Na Figura 3, é apresentada a produção relativa de MSPA de culturas anuais em solo de várzea do Brasil. A produção de matéria seca das culturas diminuiu com a omissão de N, P e K (em comparação à aplicação desses elementos no solo), e a resposta variou de cultura para cultura. Para o feijoeiro, o P foi mais limitante, seguido pelo N e K. A deficiência de P fez com que houvesse redução na quantidade de MSPA (produziu-se menos de 40% da MSPA produzida com os níveis adequados de N, P e K).

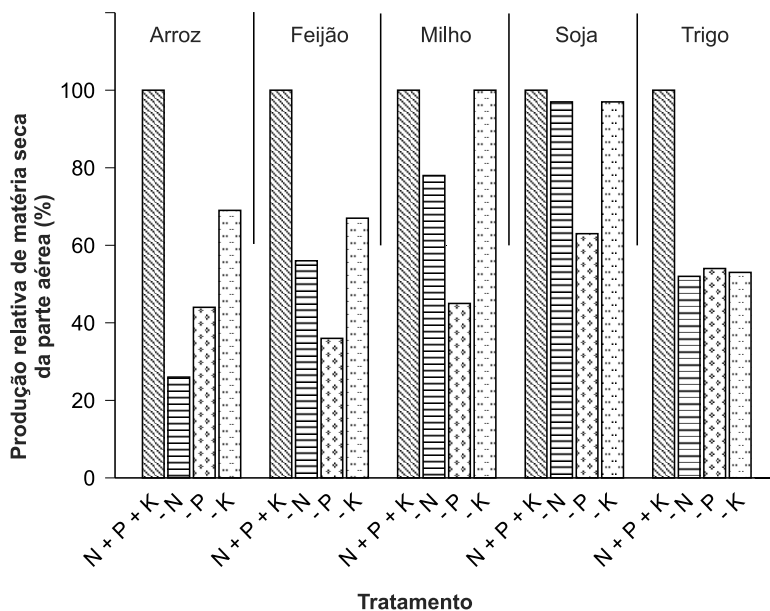


**Figura 3.** Produção relativa de matéria seca da parte aérea de culturas sob tratamentos com nitrogênio, fósforo e potássio em solo de várzea.

## ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

O índice de área foliar (IAF) é a relação entre a área foliar média de uma planta, em  $m^2$ , e a superfície correspondente do solo, em  $m^2$ . O IAF é importante parâmetro da planta para absorção e utilização de radiação solar, o que contribui no processo fotossintético e, consequentemente, no aumento da produtividade (FAGERIA et al. 2006a; FAGERIA; SANTOS, 2008). Existe variabilidade genética na formação de copa da planta e na área foliar (RASMUSSEN; GENGEBACH, 1984). O IAF é também influenciado pelas condições ambientais, como temperatura, nutrição mineral, disponibilidade de água e radiação solar (FAGERIA; SANTOS, 2008). O IAF aumenta com o aumento da idade da planta, atinge um valor máximo e depois diminui.

À medida que a área foliar cresce, o IAF aumenta, até atingir um valor a partir do qual o autossombreamento passa a ser prejudicial, pois há o aumento da superfície foliar que é mantida sob iluminação precária, o que diminui a sua eficiência fotossintética. Vários autores (PEREIRA; MACHADO,

1987; PORTES; CARVALHO, 1983; YOSHIDA, 1972) afirmam que o IAF reflete a capacidade produtiva de uma comunidade vegetal, sendo esse um índice que influencia a capacidade de competição por luz. O IAF ótimo é aquele que permite o máximo de fotossíntese e, conseqüentemente, a taxa de crescimento relativo (TCR) elevada. Tanaka e Fujita (1979) e Tanaka e Osaki (1983) relataram que o valor máximo de IAF no feijoeiro é alcançado com a idade de 60 a 70 dias, dependendo da população das plantas. Esses autores também relataram que a produtividade do feijoeiro aumenta com o aumento de IAF até 4,0. Após esse valor, a produtividade não aumenta ou pode até diminuir em razão do sombreamento mútuo de folhas e do aumento na fotorrespiração (OSAKI et al., 1997). Yoshida (1972) também relatou que a produção de matéria seca aumenta proporcionalmente com o aumento do IAF até atingir um valor máximo, que resulta em aumento da produtividade de grãos e acima do qual não há mais proporcionalidade, pois o autossombreamento provoca diminuição da taxa de fotossíntese média por unidade de área foliar.

Santos e Fageria (2008) determinaram o IAF do feijoeiro cultivado em solo de várzea influenciado pela dose e pelo método de aplicação de N (Figura 4). A evolução do IAF da cultivar Rudá de feijoeiro em relação às mudanças ontogenéticas mostrou que as diferenças entre os métodos de aplicação de cada dose de N aumentaram com o desenvolvimento das plantas de feijoeiro até 50 dias após a emergência (Figura 4). Após, houve decréscimo do IAF, o que era esperado, pois a área foliar verde vai se reduzindo, sobretudo por causa da senescência das folhas mais velhas.

O feijoeiro é planta  $C_3$ , com taxa de fotossíntese baixa em comparação à das plantas  $C_4$ , como milho, milheto e sorgo. A taxa de fotossíntese relatada para o feijoeiro situa-se na faixa de  $25 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  a  $40 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  (TANAKA; FUJITA, 1979). Sale (1975) relatou uma taxa na faixa de  $35 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  a  $40 \text{ mg CO}_2 \text{ dm}^{-2} \text{ h}^{-1}$  na Austrália. Sale (1975) e Laing et al. (1983) relataram que não houve aumento no processo fotossintético do feijoeiro quando o valor de IAF estava na faixa de  $4,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  a  $7,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ . As taxas de fotossíntese de várias culturas são apresentadas na Tabela 1. Verifica-se que a do feijoeiro é comparável com a de arroz, soja e trigo, mas é baixa em comparação com a do milho.

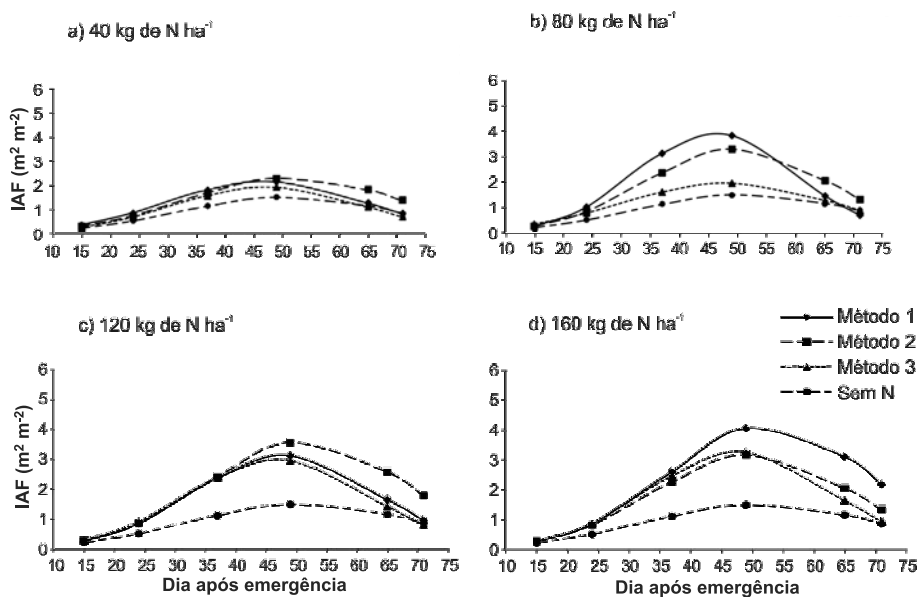


**Figura 4.** Evolução do índice de área foliar (IAF) da cultivar Rudá de feijoeiro em relação às doses e métodos de aplicação de nitrogênio (N).

Fonte: adaptado de Santos e Fageria (2008).

**Tabela 1.** Taxa de fotossíntese de várias culturas.

| Cultura   | Taxa de fotossíntese<br>(mg CO <sub>2</sub> dm <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Feijão    | 30–40                                                                          |
| Arroz     | 34–47                                                                          |
| Trigo     | 28–39                                                                          |
| Milho     | 60–80                                                                          |
| Batata    | 25–35                                                                          |
| Beterraba | 30                                                                             |
| Soja      | 30–35                                                                          |

Fonte: Murata (1980) e Tanaka e Osaki (1983).

## COMPONENTES DA PRODUTIVIDADE E CARACTERÍSTICAS ASSOCIADAS

A produtividade de feijão é a combinação de seus componentes, como número de vagens por planta ou por unidade de área, número de grãos por vagem e massa dos grãos. Teoricamente, a produtividade é determinada pela seguinte equação:

$$\text{Produtividade (t ha}^{-1}\text{)} = A \times B \times C \times 10^{-5}$$

sendo:

$A$  = número de vagens por m<sup>2</sup>

$B$  = número de grãos por vagem

$C$  = massa de 1.000 sementes (em g).

Obtém-se a produtividade máxima quando todos esses componentes alcançam o nível máximo e tem-se um balanço adequado. Apenas observando a equação, parece muito fácil aumentar a produtividade do feijão; com o simples aumento da população de plantas por unidade de área, poder-se-ia aumentar também o número de vagens e, assim, aumentar a produtividade. Entretanto, na prática, existe uma correlação negativa entre os componentes da produtividade em razão da competição das plantas pelo produto fotossintético (ADAMS, 1967; FAGERIA, 1989).

### Número de vagens versus produtividade

O número de vagens é o principal componente na determinação da produtividade do feijoeiro (FAGERIA; SANTOS, 2008; WALLACE et al., 1972). Em trabalho realizado por Fageria e Santos (2008) em solo de várzea, foi observado que o aumento da produtividade foi proporcional ao quadrado do número de vagens por planta (Figura 5). De acordo com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), houve 67% de variabilidade na produtividade graças à mudança no número de vagens por planta. O número de vagens por planta é não só controlado geneticamente, mas também influenciado por fatores ambientais, como fertilidade do solo, população de plantas e calagem (FAGERIA; SANTOS, 2008). Pode-se ver, na Figura 6, que o número de vagens aumentou 19% com o aumento do pH de 5,3 para 6,4 em um Oxissolo do Brasil Central. Foi determinada a relação entre a produtividade e seus componentes (Tabela 2). O número

de vagens por m<sup>2</sup>, o número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos foram responsáveis, respectivamente, por 55%, 36% e 32% de variação da produtividade de grãos do feijoeiro-comum. Isso significa que a maior contribuição ao aumento da produtividade de grãos foi dada pelo número de vagens por unidade de área, seguida pelo número de grãos por vagem e pela massa de 100 grãos.

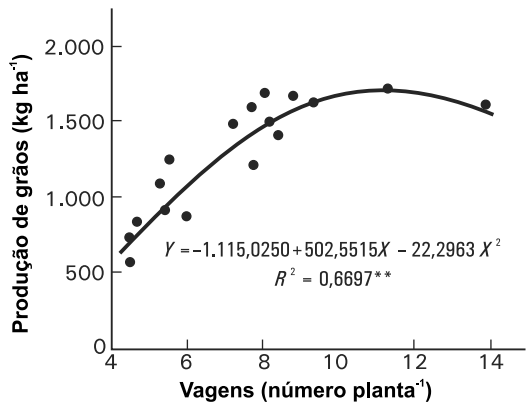


**Figura 5.** Relação entre o número de vagens por planta e a produtividade de grãos do feijoeiro em solo de várzea.  
Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2008).

**Tabela 2.** Relação entre o número de vagens por m<sup>2</sup>, o número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos (x) com a produtividade (y) do feijoeiro. Os valores são médias de cinco ensaios e três cultivos.

| Parâmetro da planta (X)             | Equação de regressão         | R <sup>2(1)</sup> |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Número de vagens por m <sup>2</sup> | Y = 3,2726 + 10,1469 X       | 0,5476**          |
| Número de grãos por vagem           | Y = -2342,4770 + 1382,2170 X | 0,3600**          |
| Massa de 100 grãos (g)              | Y = -6051,1120 + 342,7336 X  | 0,3181**          |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação. \*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.  
Fonte: Fageria e Santos (2005).

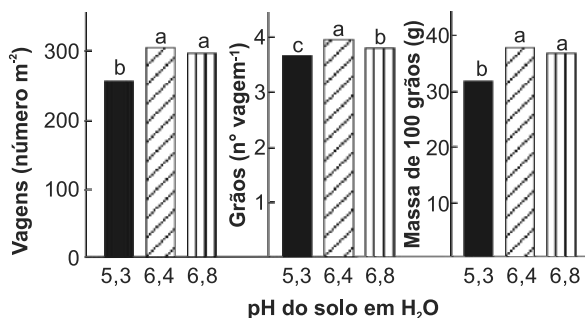


**Figura 6.** Influência do pH nos componentes da produção de grãos do feijoeiro.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2005).

### Número de grãos por vagem e massa de 100 grãos

Verifica-se, na Figura 7, aumento significativo e linear na produtividade com o aumento da massa de 100 grãos. O número de grãos por vagem apresenta associação altamente significativa ( $P < 0,01$ ) e linear com a produtividade do feijoeiro (FAGERIA et. al., 2004; FAGERIA; SANTOS, 2008). Fageria et al. (1997) relataram associação positiva entre número de grãos por vagem e massa de 100 grãos na cultura do feijoeiro.

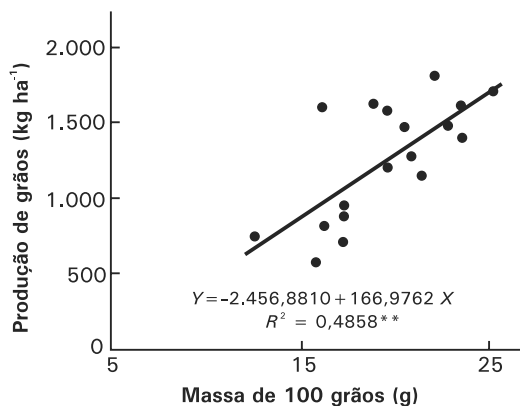


**Figura 7.** Relação entre massa de 100 grãos e produtividade de grãos do feijoeiro em solo de várzea.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2008).

O número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos são geneticamente controlados e influenciados por fatores ambientais. Observa-se, na Figura 6, que o número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos aumentaram com o aumento do pH do solo de 5,3 para 6,4. Quando o pH aumentou de 6,4 para 6,8, houve uma diminuição nos dois componentes da produtividade. Isso significa que o pH ótimo para o feijoeiro no Oxissolo onde foi cultivado está em torno de 6,4. O número de grãos por vagem de 20 genótipos do feijoeiro é apresentado na Tabela 3. Esse componente variou de 3,1 a 6,0, com

**Tabela 3.** Número de grãos por vagem de 20 genótipos de feijoeiro cultivados em Oxissolo<sup>(1)</sup>.

| Genótipo       | Número de grãos por vagem |
|----------------|---------------------------|
| Pérola         | 3,7ab                     |
| BRS Valente    | 3,1b                      |
| CNFM 6911      | 4,5ab                     |
| CNFR 7552      | 4,5ab                     |
| BRS Radiante   | 3,5b                      |
| Jalo Precoce   | 3,3b                      |
| Diamante Negro | 6,0a                      |
| CNFP 7624      | 4,2ab                     |
| CNFR 7847      | 3,4b                      |
| CNFR 7866      | 4,1ab                     |
| CNFR 7865      | 5,3ab                     |
| CNFM 7875      | 4,4ab                     |
| CNFM 7886      | 4,6ab                     |
| CNFC 7813      | 4,6ab                     |
| CNFC 7827      | 4,9ab                     |
| CNFC 7806      | 4,9ab                     |
| CNFP 7677      | 5,1ab                     |
| CNFP 7775      | 4,9ab                     |
| CNFP 7777      | 5,2ab                     |
| CNFP 7792      | 4,2ab                     |
| Média          | 4,4                       |

<sup>(1)</sup> Valores seguidos de letras iguais não diferem significativamente a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Fageria e Santos (2008).



valor médio de 4,4. Tanaka e Fujita (1979) relataram que o número de grãos por vagem variou de 3,0 a 5,4 em duas cultivares de feijoeiro em diferentes populações de plantas.

### Índice de colheita de grãos

O índice de colheita de grãos, conceito proposto por Donald (1962), é importante característica da planta na determinação da produtividade das culturas, particularmente a partir do século 20 (SINCLAIR, 1998). É a relação entre a produtividade de grãos e a produtividade biológica (dada pela produtividade de grãos somada à produtividade da parte aérea). Donald e Hamblin (1976) relataram que a produtividade das culturas está associada com o índice de colheita como:

$$\text{Índice de colheita de grãos} = \frac{\text{Produtividade de grãos}}{\text{Produtividade biológica}}$$

em que

$$\text{Produtividade biológica} = \text{produtividade de grãos} + \text{produtividade da parte aérea}$$

De acordo com essa equação, a produtividade de grãos pode ser aumentada com o aumento da produtividade biológica e com o aumento do índice de colheita de grãos, que são influenciados por fatores ambientais, como clima, solo e planta (FAGERIA, 1992). Discussão detalhada sobre a influência de fatores ambientais sobre esses parâmetros da planta é apresentada em Donald e Hamblin (1976), Fageria et al. (2006) e Fageria e Santos (2008). O índice de colheita das cultivares modernas foi aumentado significativamente e, conseqüentemente, aumentou a produtividade de grãos (SINCLAIR, 1998). O índice de colheita de grãos também é influenciado pela genética. Verifica-se, na Tabela 4, que o índice de colheita varia de genótipo para genótipo de feijoeiro e é influenciado pela dose de N.

**Tabela 4.** Índice de colheita de grãos de 20 genótipos de feijão influenciado por presença ou ausência de nitrogênio (N).

| Genótipo       | Dose de nitrogênio |                                  |
|----------------|--------------------|----------------------------------|
|                | Sem N              | Com N (400 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| Pérola         | 0,54               | 0,57                             |
| BRS Valente    | 0,27               | 0,42                             |
| CNFM 6911      | 0,50               | 0,53                             |
| CNFR 7552      | 0,29               | 0,43                             |
| BRS Radiante   | 0,36               | 0,49                             |
| Jalo Precoce   | 0,35               | 0,46                             |
| Diamante Negro | 0,32               | 0,46                             |
| CNFP 7624      | 0,21               | 0,50                             |
| CNFR 7847      | 0,46               | 0,54                             |
| CNFR 7866      | 0,24               | 0,59                             |
| CNFR 7865      | 0,46               | 0,46                             |
| CNFM 7875      | 0,21               | 0,56                             |
| CNFM 7886      | 0,23               | 0,51                             |
| CNFC 7813      | 0,32               | 0,56                             |
| CNFC 7827      | 0,40               | 0,58                             |
| CNFC 7806      | 0,38               | 0,53                             |
| CNFP 7677      | 0,38               | 0,55                             |
| CNFP 7775      | 0,38               | 0,56                             |
| CNFP 7777      | 0,50               | 0,50                             |
| CNFP 7792      | 0,42               | 0,50                             |
| Média          | 0,36               | 0,52                             |

Fonte: Fageria e Santos (2008).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para identificar os fatores que limitam a produtividade de qualquer cultura, é importante conhecer a sua fisiologia e a sua adaptabilidade a um dado ambiente. Entre os elementos que compõem a produtividade, estão o número de vagens por unidade da área, o número de grãos por vagem

e a massa de 100 sementes. Além desses componentes da produtividade, o índice de colheita e a massa da MSPA também estão associados com a produtividade das culturas. Todos esses componentes da produtividade ou características das plantas são controlados geneticamente e influenciados pelo ambiente de crescimento da cultura. Para melhorar ou maximizar o resultado de todas essas características da planta e, assim, aumentar a produtividade, é importante adotar práticas de manejo adequado do solo e da planta. A escolha de genótipos mais eficientes no aproveitamento da radiação solar, dos nutrientes e da água e mais resistentes às doenças e pragas é uma estratégia importante para aumentar a produtividade, reduzir o custo da produção e preservar o meio ambiente.

## Capítulo 3

# Calagem

## INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um dos principais fatores que limitam a produção agrícola no mundo. A distribuição de solos ácidos em várias partes do mundo é apresentada na Tabela 1, na qual se observa que a maior área de solos ácidos está localizada na América do Sul, seguida pela África. Na região tropical da América do Sul, os solos ácidos ocupam 85% da área total, e aproximadamente 850 milhões de hectares são subutilizados para a produção agrícola, segundo Cochrane (1991). Encontra-se, na Tabela 2, a distribuição de solos ácidos no Brasil. Observa-se que 68% da área do País apresentam solos ácidos e que o maior percentual está nas regiões Norte e Centro-Oeste. Quaggio (2000) relatou que mais de 70% dos solos brasileiros são ácidos, o que lhes confere características limitantes ao desenvolvimento da maioria das culturas agrícolas. Assim, a correção da acidez do solo torna-se imprescindível para aumentar os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg), além de aumentar a disponibilidade de fósforo (P) e reduzir as de alumínio (Al) e manganês (Mn), que são tóxicos ao crescimento radicular (CAIRES et al., 2004, 2006; CARVALHO-PUPPATO et al., 2004; CORRÊA et al.; 2008; FAGERIA; BALIGAR, 2008; FAGERIA; MOREIRA, 2011).

Na Tabela 3, são apresentadas propriedades químicas dos solos de Cerrado e várzeas do Brasil, que são ácidos (FAGERIA, 2008a; FAGERIA; BRESEGHELLO, 2004; FAGERIA et al., 1991, 1994, 1997b, 1997c; FAGERIA; STONE, 2004, 1999; GOEDERT, 1989).

Fageria e Stone (1999) relataram que culturas como arroz, amendoim, batata, feijão-caupi, mandioca, milho e guandu são relativamente tolerantes à acidez do solo, enquanto feijão-comum, soja e trigo são suscetíveis. Na teoria, a acidez do solo é medida como o teor de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$  no solo. Entretanto, na prática, a acidez do solo é um complexo de vários fatores como deficiência/toxicidade nutricional, baixa atividade biológica e baixa capacidade de retenção de água do solo. Na maioria dos solos brasileiros, o teor de Al é elevado, o que limita o desenvolvimento do sistema radicular e, conseqüentemente, reduz a absorção, o transporte e a utilização dos nutrientes e leva à diminuição da produtividade das culturas (FAGERIA; BALIGAR, 2008; SILVA et al., 1984). O uso de calagem é a prática mais eficiente e dominante para promover a redução da acidez e o aumento da produtividade do feijoeiro nos solos ácidos brasileiros (FAGERIA, 2001a, 2001b, 2001c, 2006b, 2008a; FAGERIA et al., 2011).

Neste Capítulo, serão discutidos resultados de pesquisa sobre calagem para a cultura do feijoeiro conduzida nos ecossistemas Cerrado e várzeas levando-se em conta a magnitude da acidez dos solos no Brasil e o potencial que essas áreas oferecem para aumentar a produção das culturas.

**Tabela 1.** Distribuição dos solos ácidos em várias partes do mundo.

| Classificação da acidez        | Distribuição dos solos ácidos (10 <sup>6</sup> ha) |                  |        |       |        |
|--------------------------------|----------------------------------------------------|------------------|--------|-------|--------|
|                                | América do Sul                                     | América do Norte | África | Ásia  | Europa |
| Acidez leve (pH 5,5 a 6,5)     | 244,6                                              | 207,3            | 430,6  | 170,4 | 3,4    |
| Acidez moderada (pH 4,5 a 5,5) | 443,3                                              | 300,9            | 327,8  | 191,6 | 53,2   |
| Acidez forte (pH 3,5 a 4,5)    | 364,5                                              | 90,4             | 119,3  | 318,7 | 131,0  |
| Acidez muito forte (pH < 3,5)  | 127,9                                              | 0                | 3,1    | 6,6   | 10,8   |
| Total                          | 1.180,3                                            | 598,6            | 880,8  | 687,3 | 198,4  |

Fonte: Eswaran et al. (1997).

**Tabela 2.** Distribuição dos solos ácidos no Brasil.

| Região               | Distribuição dos solos ácidos     |                                   |                   |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                      | Área mapeada (10 <sup>6</sup> ha) | Solos ácidos (10 <sup>6</sup> ha) | % de solos ácidos |
| Norte e Centro-Oeste | 600,8                             | 446,8                             | 74                |
| Nordeste             | 96,5                              | 39,1                              | 40                |
| Sudeste              | 44,5                              | 28,0                              | 63                |
| Sul                  | 60,0                              | 33,9                              | 56                |

Fonte: Rosolem (1990).

**Tabela 3.** Propriedades químicas dos solos de Cerrado e várzeas do Brasil.

| Característica        | Cerrado <sup>(1)</sup> | Várzea <sup>(2)</sup> |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| pH (H <sub>2</sub> O) | 5,2                    | 5,3                   |

Continua...

**Tabela 3.** Continuação.

| <b>Característica</b>                          | <b>Cerrado<sup>(1)</sup></b> | <b>Várzea<sup>(2)</sup></b> |
|------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Cálcio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )   | 0,64                         | 4,9                         |
| Magnésio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 0,58                         | 3,1                         |
| Alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 0,64                         | 1,3                         |
| Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )                 | 1,2                          | 16                          |
| Potássio (mg kg <sup>-1</sup> )                | 47,2                         | 92                          |
| Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )                   | 1,3                          | 2,2                         |
| Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )                   | 1,0                          | 2,4                         |
| Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )                   | 116                          | 3,3                         |
| Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )                | 14                           | 59                          |
| Matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> )         | 15                           | 31                          |
| Saturação por base (%)                         | 17                           | 50                          |

<sup>(1)</sup> Os valores são médias de 200 amostras do solo coletadas de seis estados na região do Cerrado.

<sup>(2)</sup> Os valores são médias de 55 amostras do solo coletadas de oito estados em solos de várzeas.

Fonte: Fageria e Stone (1999).

## CAUSAS DA ACIDIFICAÇÃO DOS SOLOS

Conceitualmente, as taxas de acidificação do solo resultam da medição da mudança do pH por unidade de tempo (DOERGE; GARDNER, 1985). A acidez do solo tem diferentes fontes; cada uma gera acidez em quantidade e intensidade específicas (FAGERIA et al., 1999).

### Lixiviação de cátions básicos

A acidez pode resultar dos materiais de origem que eram ácidos e naturalmente pobres nos cátions básicos Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, potássio (K<sup>+</sup>) e sódio (Na<sup>+</sup>) ou que tiveram esses elementos lixiviados do seu perfil por chuvas fortes (KAMPRATH; FOY, 1972). Quando a precipitação é maior do que a evapotranspiração, ocorre a lixiviação. Em solos altamente lixiviados, do material de origem restam somente os óxidos de ferro (Fe) e Al e alguns óxidos de metais pesados, que são altamente resistentes ao intemperismo (BOHN et al., 1979). Essa é a principal causa da acidez em solos úmidos tropicais.

No Cerrado brasileiro, que ocupa cerca de 207 milhões de hectares, o pH médio do solo está em torno de 5. O total anual de chuvas na região pode variar de 600 mm, em áreas sob influência do Semiárido, a 2 mil mm, em áreas sob influência amazônica. Contudo, em 75% da área do bioma Cerrado, chove entre 1.000 mm e 1.600 mm (SOUSA et al., 2008), e a lixiviação de bases a longo prazo é uma das principais razões do desenvolvimento de acidez nos solos (FAGERIA et al., 1999). De acordo com Bolan et al. (1991), sob condições climáticas em que a precipitação é maior do que a evaporação, a acidificação do solo é um processo contínuo, que pode ser acelerado pela atividade das plantas, animais e seres humanos ou diminuído pelo manejo adequado. Na Austrália, onde o trevo vem sendo cultivado por mais de 30 anos, o pH do solo diminuiu em cerca de uma unidade (WILLIAMS, 1980). Na Nova Zelândia, as pastagens necessitam da aplicação de 2,5 t de calcário ha<sup>-1</sup>, a cada 6 anos, para neutralizar a acidez causada em grande parte pela fixação biológica de nitrogênio (N) e pelo uso de fertilizantes (PRINGLE et al., 1985).

## Aplicação de fertilizantes nitrogenados

A nitrificação, a volatilização de amônia e a lixiviação de nitratos são alguns dos mecanismos responsáveis pela acidificação do solo, decorrentes da aplicação de fertilizantes contendo amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e amônia (NH<sub>3</sub>).

### Nitrificação

O processo pelo qual o NH<sub>4</sub><sup>+</sup> é oxidado para produzir íons NO<sub>3</sub><sup>-</sup> é chamado de nitrificação. A adubação nitrogenada das culturas pode resultar em acidificação do solo graças a esse processo mediado por microrganismos autotróficos ou heterotróficos:



Os grupos de bactérias autotróficas *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* são os mais importantes nitrificadores na maioria dos solos cultivados. A magnitude e a profundidade de acidificação do solo dependem das doses e das fontes de N (ADAMS, 1984). A combinação da amonificação e da nitrificação de compostos orgânicos nitrogenados, incluindo a ureia, resulta, teoricamente, na geração líquida de 1 mol de prótons para cada mol de N transformado. A oxidação dos fertilizantes amoniacais resulta na geração líquida de 2 moles de prótons para cada mol de N



(BOLAN et al., 1991). Isso está em concordância com a observação de muitos pesquisadores de que o grau de acidificação do solo geralmente é maior após a aplicação de fertilizantes amoniacais do que após a de ureia (FAGERIA et al., 1999). A adição de fertilizantes básicos, como  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  e  $\text{NaNO}_3$ , causa pouca acidificação ou, às vezes, aumenta o pH do solo (AWARD; EDWARDS, 1977; KHONJE et al., 1989).

Blevins et al. (1978) observaram que o pH nos 5 cm superficiais do solo caiu de 5,7 para 4,6 ou menos com a aplicação, por 5 a 7 anos, de 220 kg de N  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  a 230 kg de N  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  em solo com cultivo de milho sob plantio direto. Já o pH nos 2,5 cm superficiais do solo de parcelas que receberam 202 kg de N  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , nas formas de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , ureia e solução de ureia- $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , durante 5 anos, ficou em torno de 5,7 ou uma unidade abaixo da testemunha, conforme Fox e Hoffman (1981). Nas parcelas que receberam a mesma dose de N na forma de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , o pH foi de 4,7.

A diminuição do pH em razão do uso de fertilizantes contendo amônio foi registrada por vários pesquisadores. Hetrick e Schwab (1992) verificaram que a aplicação anual de 225 kg de N  $\text{ha}^{-1}$  (na forma de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), por mais de 40 anos, em um solo francosiltoso, diminuiu o pH de 6,9 para 4,1. Darusman et al. (1991) relataram que não houve diferença significativa nas propriedades do solo entre os tratamentos com  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , ureia e ureia- $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Por outro lado, o uso de fertilizantes nitrogenados durante 20 anos diminuiu significativamente o pH do solo (pH 5,2), em comparação à testemunha, na camada de 6 cm a 14 cm (pH 6,2). Stumpe e Vlek (1991) destacaram que ocorreu acidificação de solos tropicais (Alfissolo, Ultissolo e Oxissolo) graças ao uso de três fontes de N, nessa ordem: sulfato de amônio > ureia > nitrato de amônio. Malhi et al. (1991) constataram que a taxa média anual de diminuição do pH na camada de 0 a 5 cm do solo, com a aplicação de 112 kg de N  $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ , variou de 0,09 a 0,16. O valor e a profundidade de diminuição do pH foram maiores após a aplicação de sulfato de amônio, seguido pela de nitrato de amônio; a aplicação de ureia teve pouco efeito e a de nitrato de cálcio não teve efeito sobre a diminuição do pH. Os autores determinaram o efeito de sulfato de amônio no pH do solo de várzea após a colheita de três safras de arroz irrigado (Figura 1). O pH diminuiu significativamente com a aplicação de sulfato de amônio na faixa de 0 a 210 kg  $\text{ha}^{-1}$ , e o teor de  $\text{Al}^{3+}$  aumentou linearmente (Figura 2). O aumento do  $\text{Al}^{3+}$  estava relacionado com a redução do pH e a diminuição do teor de  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 3). O Al foi determinado 3 anos após o cultivo de arroz, e o N foi aplicado em todos os anos.

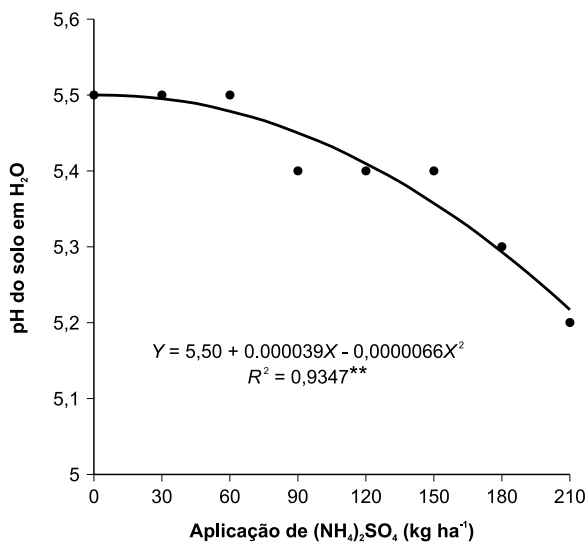


**Figura 1.** Relação entre a aplicação de sulfato de amônio e o pH do solo de várzea.

**\*\***Significativo a 1% de probabilidade.

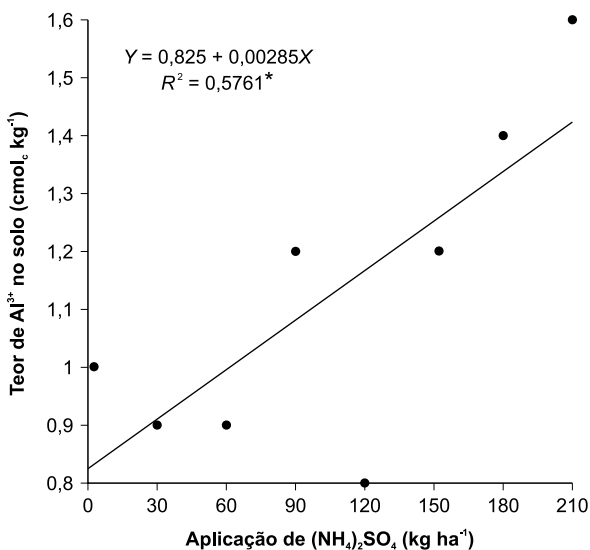


**Figura 2.** Relação entre a aplicação de sulfato de amônio e o teor de  $\text{Al}^{3+}$  em solo de várzea.

**\*\***Significativo a 5% de probabilidade.

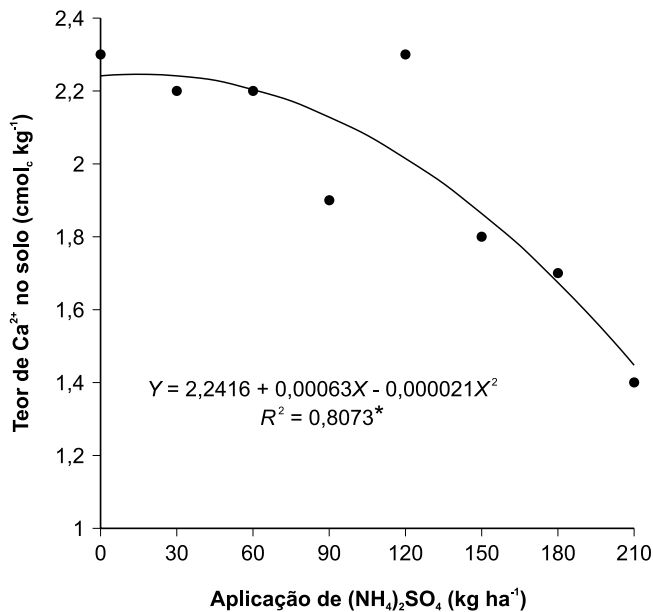
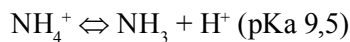


**Figura 3.** Influência da aplicação de sulfato de amônio no teor de cálcio em solo de várzea cultivado com arroz irrigado.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

### Volatilização de amônia

A volatilização de amônia após aplicação superficial de fertilizantes nitrogenados também pode produzir acidez. Durante esse processo, o pH da camada superficial do solo diminui por causa da liberação de íons  $\text{H}^+$  pela conversão de  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NH}_3$  (AVNIMELECH; HAHER, 1977):



### Lixiviação de nitratos

A lixiviação de nitratos provoca acidez permanente do solo somente quando a perda de  $\text{NO}_3^-$  não acompanha o sistema de equilíbrio de  $\text{H}^+$  (BOLAN et al., 1991). Se forem aplicados fertilizantes contendo  $\text{NH}_4^+$  ou  $\text{R-NH}_2$  e oxidados a  $\text{NO}_3^-$  no solo, haverá geração líquida de um íon  $\text{H}^+$  (amonificação + nitrificação) e de dois íons  $\text{H}^+$  (nitrificação), que só serão neutralizados se os íons  $\text{NO}_3^-$  forem completamente convertidos

à sua forma original pelo ciclo do N. Se os íons  $\text{NO}_3^-$  saírem do sistema, os íons  $\text{H}^+$  permanecerão no solo, traduzindo-se em acidez permanente (HELYAR, 1976).

### **Geração de prótons no solo**

Os processos mais significativos de geração de prótons ( $\text{H}^+$ ) e íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) ocorrem durante os ciclos do carbono (C), do N e do enxofre (S). No caso do ciclo do C, as duas principais fontes de geração de íons  $\text{H}^+$  são a dissolução de  $\text{CO}_2$  para formar ácido carbônico e para a síntese e dissociação de ácidos carboxílicos (BOLAN et al., 1991). A concentração de  $\text{CO}_2$  no ar contido no solo, de acordo com Russel (1988), situa-se geralmente entre 0,15% e 0,65%, e o pKa da reação é em torno de 6,1:



A produção contínua de  $\text{CO}_2$  pelo solo e pela respiração das raízes desloca essa reação para a direita.

Durante o ciclo do S, a mineralização e a oxidação do S orgânico resultam na produção de íons  $\text{H}^+$ . No caso do ciclo do N, a acidificação do solo também pode ocorrer graças aos processos induzidos pelas plantas, tais como a absorção e a assimilação de amônio e a fixação biológica de N.

### **Processos induzidos pelas plantas**

As plantas absorvem o N de três formas principais: como ânion ( $\text{NO}_3^-$ ), como cátion ( $\text{NH}_4^+$ ) e como molécula neutra ( $\text{N}_2$ , pela fixação biológica de N). Dependendo da forma de absorção do N e do mecanismo de assimilação pela planta, pode ocorrer excesso de absorção de cátions ou de ânions (HAYNES, 1983). Para manter o equilíbrio de cargas durante o processo de absorção, os íons  $\text{H}^+$  ou  $\text{OH}^-$  devem ser liberados das raízes para a rizosfera. Os íons  $\text{H}^+$  podem ser oriundos da dissociação de ácidos orgânicos dentro da célula, e os íons  $\text{OH}^-$  da descarboxilação de ânions de ácidos orgânicos. A absorção de  $\text{NH}_4^+$  e a fixação biológica de N resultam em liberação líquida de íons  $\text{H}^+$ , enquanto a absorção de  $\text{NO}_3^-$  pode resultar em liberação líquida de íons  $\text{OH}^-$  (FAGERIA et al., 1999).

### **Absorção e assimilação de amônio**

Quando a assimilação ocorre nas raízes, a retirada de prótons do  $\text{NH}_4^+$  libera um mol de  $\text{H}^+$  por mol de  $\text{NH}_4^+$  (RAVEN; SMITH, 1976). Pequenas quantidades adicionais de íons  $\text{H}^+$  são geradas durante a assimilação de  $\text{NH}_3^-$  pelos aminoácidos.

### **Fixação biológica de nitrogênio**

Quanto à fixação biológica de N, o elemento neutro pode ser assimilado por proteínas sem provocar desequilíbrio de cargas na fronteira entre o solo e as raízes. Entretanto, muitas leguminosas geralmente exportam íons  $\text{H}^+$  para a rizosfera quando estão fixando N ativamente (NYATSANGA; PIERRE, 1973). Uma parte dos íons  $\text{H}^+$  gerados dentro das raízes das leguminosas é proveniente da dissociação de grupos carboxílicos de aminoácidos. A acidez gerada pela fixação biológica de N é equivalente ao excesso de absorção de cátions em relação à de ânions pela planta e varia de 0,2 mol a 0,7 mol de  $\text{H}^+$  por mol de N fixado (JARVIS; ROBSON, 1983). Segundo Israel e Jackson (1978), a quantidade de íons  $\text{H}^+$  liberada durante a fixação biológica de N depende, principalmente, da forma e da quantidade de aminoácidos e ácidos orgânicos sintetizados dentro da planta.

### **Mineralização da matéria orgânica**

A acidez do solo pode ser produzida também pela decomposição de restos culturais ou de quaisquer outros resíduos orgânicos em ácidos orgânicos. O material húmico que ocorre no solo é resultado da decomposição microbiana da matéria orgânica. Os produtos da decomposição pertencem a vários tipos de grupos funcionais que são capazes de atrair e dissociar íons  $\text{H}^+$ . A concentração do ácido produzido depende da natureza do grupo funcional predominante. Existem vários ácidos húmicos que resultam de materiais heterogêneos. Portanto, o desenvolvimento da acidez advinda da retirada de prótons dos ácidos orgânicos depende da vegetação (HUDNALL, 1991). A matéria orgânica não tem um papel direto na acidificação do solo, mas funciona como um trocador de cátions (BREEMEN et al., 1984). Esse tipo de acidez é mais comum nos Histossolos.

### **Redução e oxidação dos sulfatos**

A acidez também pode ser desenvolvida pela redução e oxidação dos sulfatos que, em água do mar, são reduzidos para  $\text{H}_2\text{S}$  e pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

A oxidação da pirita resulta na formação de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . De acordo com Hudnall (1991), o pH do solo associado com a oxidação da pirita pode tornar-se extremamente baixo ( $\text{pH} < 3,0$ ). Geralmente, os solos ácidos contendo sulfatos, que são ácidos por natureza ou tornam-se ácidos ( $\text{pH} < 3,5$ ) graças ao ácido sulfúrico, são formados em séries recentes em pântanos, mangues ou outras áreas permanentemente inundadas. A taxonomia fornece dois critérios para solos ácidos contendo sulfatos: mais de 0,75% do S na forma de sulfetos e pH em água (relação solo:água 1:1) igual ou abaixo de 3,5 após a oxidação (ESTADOS UNIDOS, 1975). Seguindo esse sistema de classificação, incluem-se, no primeiro grupo, os solos potencialmente ácidos contendo sulfeto e, no segundo grupo, os solos realmente ácidos contendo sulfato. Conforme Tran (1991), há cerca de 12,5 milhões de hectares de solos ácidos contendo sulfato nas terras baixas da área costeira do sudeste e leste da Ásia, no oeste da África e na América Latina.

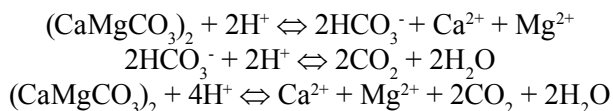
## Reacidificação

Doerge e Gardner (1985) observaram a elevação das taxas de acidificação do solo após o aumento da quantidade de calcário aplicada inicialmente. A acidez foi estimada tanto pela diminuição do pH (em torno de 0,025 unidade de  $\text{pH ano}^{-1}$ ) quanto pela presença de cátions básicos extraíveis ( $0,17 \text{ cmol}_c \text{ de } \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \text{ kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). Em contraste, um solo que não recebeu calagem não apresentou acidificação líquida. A reacidificação mais rápida dos solos que recebem altas doses de calcário deve-se ao fato de que os processos de acidificação, tais como nitrificação, liberação de  $\text{CO}_2$  pela respiração das plantas e dos microrganismos, mineralização da matéria orgânica e dissociação de ácidos orgânicos na solução do solo, dependem do pH.

## MUDANÇAS QUÍMICAS COM CALAGEM EM SOLOS ÁCIDOS

Com a calagem em solos ácidos, ocorrem várias mudanças químicas na rizosfera. Essas mudanças influenciam significativamente a solubilidade dos nutrientes e sua absorção pelas plantas e permitem melhorar o crescimento e desenvolvimento das culturas e, consequentemente, propiciar altas produtividades (FAGERIA, 2002b; FAGERIA; STONE, 2006). Para corrigir a acidez do solo, deve ser usado calcário dolomítico, cuja fórmula é  $(\text{CaMgCO}_3)_2$ , que contém  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e pode manter o equilíbrio entre

os dois elementos. Observam-se, nas equações seguintes, as reações que ocorrem com a aplicação de calcário dolomítico no solo:



Entre as modificações mais proeminentes que ocorrem na rizosfera de solos ácidos graças à aplicação de calcário, estão: 1) aumento nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ; 2) aumento na saturação por bases e no pH; 3) aumento na saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  e na saturação por  $\text{Mg}^{2+}$ ; 4) diminuição na acidez do solo ( $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ); 5) aumento na mineralização da matéria orgânica; 6) aumento na atividade dos microrganismos responsáveis pela fixação biológica de N em leguminosas; 7) aumento na disponibilidade de P; e 8) aumento no crescimento das raízes, o que permite maior absorção de nutrientes e água. Na Tabela 4, são apresentadas as mudanças no pH, os teores de Ca e Mg e a saturação por bases após a aplicação de calcário em um Oxissolo. Com o aumento das doses de calcário na faixa de 0 a 20 t ha<sup>-1</sup>, houve mudanças significativas nessas propriedades químicas do solo.

**Tabela 4.** Influência do calcário no pH, nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e na saturação por bases na camada de 0 a 20 cm de profundidade de um Oxissolo após oito cultivos (arroz de terras altas, feijão, milho e soja em sistema de rotação).

| Dose de calcário<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | pH em<br>H <sub>2</sub> O | Ca <sup>2+</sup><br>(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | Mg <sup>2+</sup><br>(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | Saturação<br>por bases (%) |
|-------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| 0                                         | 5,6                       | 1,92                                                      | 1,09                                                      | 40                         |
| 4                                         | 6,0                       | 2,33                                                      | 1,14                                                      | 44                         |
| 8                                         | 6,2                       | 3,00                                                      | 1,21                                                      | 51                         |
| 12                                        | 6,4                       | 3,10                                                      | 1,25                                                      | 53                         |
| 16                                        | 6,5                       | 3,30                                                      | 1,25                                                      | 56                         |
| 20                                        | 6,8                       | 3,77                                                      | 1,39                                                      | 66                         |
| R <sup>2(1)</sup>                         | 0,83**                    | 0,72**                                                    | 0,23*                                                     | 0,96**                     |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2001b, 2001c).

Em um ensaio de casa de vegetação, Fageria (2001b, 2001c) estudou a influência de calagem nas principais propriedades de um Oxissolo; os resultados são apresentados na Tabela 5. Com a calagem, houve aumento significativo nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e P e nas saturações por  $\text{Ca}^{2+}$  e por  $\text{Mg}^{2+}$ . Os teores de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  diminuíram significativamente, porém não houve efeito significativo nos teores de  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$  e na saturação por  $\text{K}^+$ .

**Tabela 5.** Mudanças nas principais propriedades químicas de um Oxisolo com a aplicação de calcário<sup>(1)</sup>.

| Propriedade química                          | Sem calcário (pH 4,5) | Com calcário (pH 6,4) |
|----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Cálcio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )   | 0,95b                 | 3,90a                 |
| Magnésio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | 0,29b                 | 2,21a                 |
| Alumínio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | 0,75a                 | 0,00b                 |
| Saturação por cálcio (%)                     | 11,79b                | 51,82a                |
| Saturação por magnésio (%)                   | 3,65b                 | 29,19a                |
| Saturação por potássio (%)                   | 0,48a                 | 0,51a                 |
| Fósforo ( $\text{mg kg}^{-1}$ )              | 6,21b                 | 11,05a                |
| Zinco ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                | 8,98a                 | 9,61a                 |
| Cobre ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                | 1,47a                 | 1,50a                 |
| Ferro ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                | 228,17a               | 180,76b               |
| Manganês ( $\text{mg kg}^{-1}$ )             | 5,86a                 | 6,35a                 |

<sup>(1)</sup>Valores seguidos pela mesma letra, na mesma linha, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2004).

## Índices de acidez

No Brasil, são usados diversos índices de acidez para verificar se existe ou não necessidade de calagem, que foram desenvolvidos pelos programas regionais de pesquisa em fertilidade do solo (NOLLA; ANGHINONI, 2006). Os indicadores de acidez mais utilizados são o pH em água, no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 2004); a saturação por bases, em São Paulo (RAIJ et al., 2001) e em alguns estados vizinhos (SOUZA et al., 1989; WIETHOLTER, 2000); o Al trocável, nos estados das regiões



Nordeste, Norte e parte do Centro-Oeste (QUAGGIO, 2000); e o Al, Ca e Mg trocáveis, principalmente na região do Cerrado (RIBEIRO et al., 1999; SOUSA; LOBATO, 2004). Para o diagnóstico da acidez com vistas a verificar a necessidade de reaplicação de calcário após um período de 4 a 5 anos, a camada de solo utilizada é de 0 a 20 cm (NOLLA; ANGHINONI, 2006).

Em resumo, os índices relacionados à acidez dos solos são acidez ativa ou pH (em água,  $\text{CaCl}_2$  a 0,01 M ou KCl a 0,1 M), saturação por bases, saturação por Ca, saturação por Mg, saturação por K, relação Ca/Mg, relação Ca/K, relação Mg/K, saturação por Al e acidez potencial como  $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ . A maioria desses índices de acidez são positivamente associados com a produtividade do feijoeiro, com exceção da saturação por Al (FAGERIA, 2008b; FAGERIA et al., 2007; FAGERIA; STONE, 2004).

### **pH do solo**

O pH, que indica a acidez ou a alcalinidade relativa de um substrato, é frequentemente citado como a mais importante propriedade química do solo. A escala de pH cobre uma faixa de 0 a 14, em que 7,0 indica pH neutro, valores abaixo de 7,0 indicam acidez e valores acima de 7,0 indicam alcalinidade. A maioria dos solos agrícolas está em uma faixa de pH de 4,0 a 9,0 (Tabela 6).

O pH pode ser definido como o logaritmo negativo da concentração de íons  $\text{H}^+$ . Na realidade, é a atividade do íon  $\text{H}^+$  ( $a\text{H}^+$ ) que é medida por meio de métodos potenciométricos, em vez da concentração de  $\text{H}^+$ . Assim, o pH é mais corretamente definido pela seguinte equação:

$$\text{pH} = -\log a\text{H}^+$$

A significância prática da relação logarítmica é que cada mudança de unidade no pH do solo corresponde a um aumento de dez vezes na acidez ou na alcalinidade, como pode ser visto na Tabela 6. Isso significa que um solo com pH igual a 6,0 tem dez vezes mais  $\text{H}^+$  ativo do que um outro com pH igual a 7,0 e que a necessidade de calagem cresce rapidamente à medida que diminui o pH. Embora o pH seja usado para identificar um solo que necessita de calagem, frequentemente a quantidade de calcário é altamente variável por causa da natureza dinâmica de vários processos do solo e das interações desses processos com as plantas e os microrganismos (ADAMS, 1984).

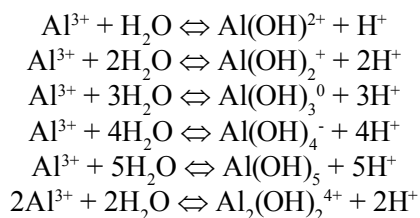
**Tabela 6.** Classificação de acidez e alcalinidade dos solos com base no pH.

| Valor de pH | Classificação          | Valor de pH | Aumento da acidez/<br>alcalinidade comparada<br>ao pH 7 |
|-------------|------------------------|-------------|---------------------------------------------------------|
| < 4,5       | Extremamente ácido     | 4,0         | Acidez (1.000)                                          |
| 4,5–5,0     | Muito fortemente ácido | 5,0         | Acidez (100)                                            |
| 5,0–5,5     | Fortemente ácido       | 6,0         | Acidez (10)                                             |
| 5,5–6,0     | Moderadamente ácido    | 7,0         | Neutralidade                                            |
| 6,0–7,0     | Ligeiramente ácido     | 8,0         | Alcalinidade (10)                                       |
| 7,0–7,5     | Ligeiramente alcalino  | 9,0         | Alcalinidade (100)                                      |
| 7,5–8,5     | Moderadamente alcalino |             |                                                         |
| 8,5–9,0     | Fortemente alcalino    |             |                                                         |
| > 9,0       | Extremamente alcalino  |             |                                                         |

Fonte: Fageria et al. (1999).

Oliveira et al. (1996) relataram que o pH do solo é o primeiro ponto a ser trabalhado para a produção de feijão, visto que somente após a calagem pode-se ter noção da real disponibilidade dos nutrientes. Quando o pH está entre 5,5 e 6,5, os nutrientes encontram-se em disponibilidade máxima (N, P, K, Ca, Mg, S e boro – B) ou adequada (cobre – Cu –, Fe, Mn, molibdênio – Mo – e zinco – Zn), enquanto o teor de Al em concentração tóxica é reduzido ou mínimo (HEINRICHS et al., 2008). A disponibilidade relativa desses 12 nutrientes essenciais às plantas como uma função do pH do solo pode ser observada na Figura 4.

A medida do pH na solução do solo representa a acidez ativa do solo. Os íons  $H^+$  e  $Al^{3+}$  absorvidos pelo solo, bem como outros constituintes do solo que geram íons  $H^+$ , constituem a acidez de reserva. Os íons  $Al^{3+}$  geram íons  $H^+$  por uma série de reações de hidrólise (LINDSAY, 1979):



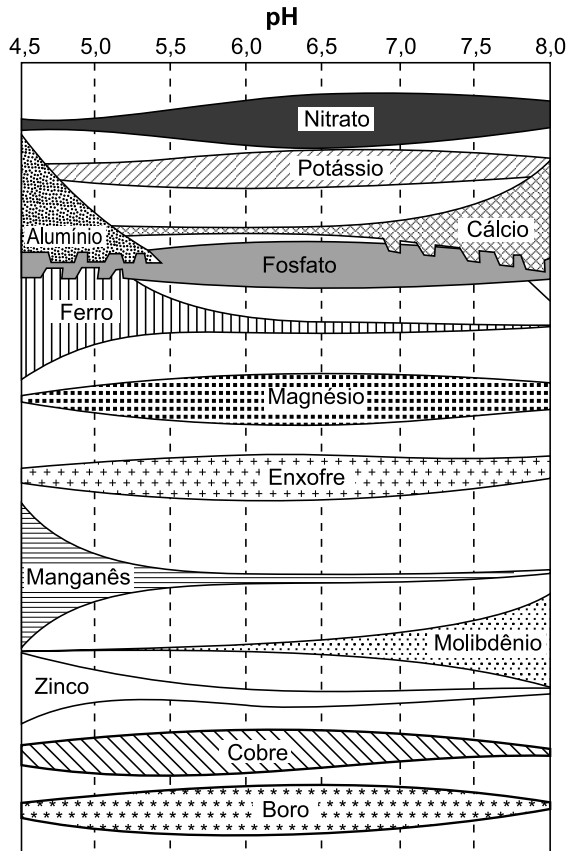


**Figura 4.** Disponibilidade relativa de 12 nutrientes essenciais às plantas e do alumínio (Al) em solos minerais bem drenados.

Nota: O padrão serrilhado representa precipitação de fósforo.

Fonte: adaptado de Liming... (1978).

Para simplificar, esses tipos de hidrólise são geralmente apresentados sem a água de hidratação, mesmo a água estando presente. Vários óxidos e hidróxidos de Al podem existir no solo. A atividade do  $\text{Al}^{3+}$  em equilíbrio com qualquer desses minerais é dependente do pH e decresce 1.000 vezes para cada unidade de aumento no pH (LINDSAY, 1979). As sucessivas reações de hidrólise estão associadas com soluções de pH sucessivamente mais alto, pois o dreno para íons  $\text{H}^+$  aumenta com o aumento do pH. A distribuição das espécies de Al conforme o pH é:

- $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$  é de menor importância e existe somente em uma faixa estreita de pH.
- $\text{Al}(\text{OH})_5$  ocorre somente em solos com pH acima daqueles dos solos agrícolas.
- $\text{Al}^{3+}$  predomina em solos com pH abaixo de 4,7.
- $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  ocorre em solos com pH entre 4,7 e 6,5.
- $\text{Al}(\text{OH})_3^0$  ocorre em solos com pH entre 6,5 e 8,8.
- $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  ocorre em solos com pH acima de 8,0 (MARION et al., 1976).

Existe considerável controvérsia sobre a hidrólise de  $\text{Al}^{3+}$  e as constantes de estabilidade para várias espécies monômeras e polímeras (LINDSAY, 1979); há, portanto, necessidade de investigações adicionais.

Vários autores discutiram as atividades químicas do Al e de seus compostos na solução do solo como indicadores da toxicidade desse elemento (FAGERIA et al., 1999; KINRAIDE, 1991; PARKER et al., 1988; SHUMAN et al., 1990). Para Kinraide (1991), a identificação das espécies tóxicas de Al é problemática por causa das seguintes razões:

- Há coexistência de várias espécies de Al na solução do solo (portanto, as espécies individuais não podem ser estudadas isoladamente, nem mesmo em solução nutritiva).
- A atividade de cada espécie deve ser calculada pelos dados de equilíbrio, que são muito variáveis.
- Se  $\text{H}^+$  melhora a toxicidade de  $\text{Al}^{3+}$ , o hidróxido de alumínio mononuclear pode parecer tóxico quando não é; e
- A identificação e a atividade das espécies de Al que entram em contato com a superfície celular não são bem definidas por causa das correntes de  $\text{H}^+$  através da superfície das raízes e de outras cargas superficiais.

Kinraide (1991) concluiu que  $\text{Al}_{13}$  e  $\text{Al}^{3+}$  são tóxicos para as raízes. O hidróxido de alumínio mononuclear (excluindo os aluminatos) parece ser tóxico para as raízes de plantas dicotiledôneas, mas essa aparente toxicidade pode ser atribuída às espécies de hidróxido de alumínio mononucleares contendo  $\text{Al}^{3+}$ , incluindo  $\text{AlOH}^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH}_3)^0$  e  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ . Os aluminatos não são significativos em solos com pH menor do que 5,0 (Figura 5). Kinraide (1991) discute várias hipóteses para a toxicidade de Al em relação a várias espécies químicas desse elemento.

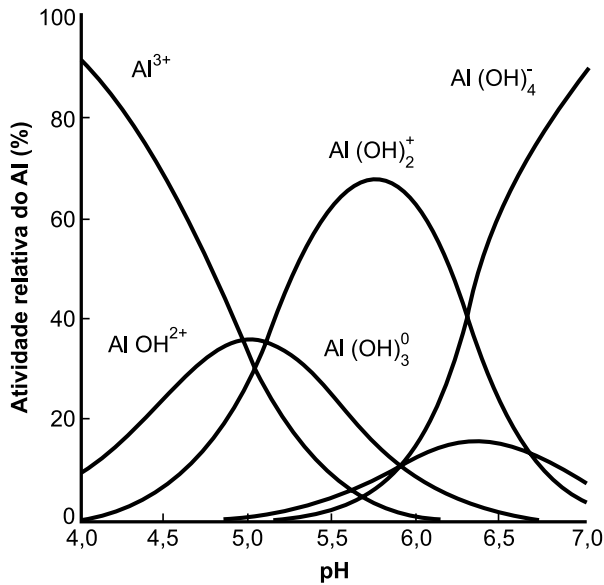


**Figura 5.** Atividade relativa de espécies mononucleares de alumínio (Al) em relação ao pH.

Fonte: adaptado de Kinraide (1991).

O pH influenciou significativamente a produtividade do feijoeiro em solo de Cerrado no sistema de plantio direto: as produtividades máximas foram obtidas com o pH de 6,7 na camada de 0 a 10 cm de profundidade e o pH de 6,3 na camada de 10 cm a 20 cm de profundidade (Figura 6). Na média das duas profundidades, a produtividade máxima foi obtida com o pH de 6,5. A produtividade de grãos aumentou 47% quando o pH passou de 5,3 para 6,7 na camada de 0 a 10 cm de profundidade. Fageria (2001b, 2001c) relatou que a produtividade máxima do feijoeiro foi obtida com o pH de 6,2 em solo de Cerrado. Segundo Rosolem (1996), resultados de diversas pesquisas revelaram que a máxima produtividade de feijão ocorre quando o pH do solo medido em água encontra-se entre 6,0 e 7,0. O aumento na produtividade do feijão pode ser associado com o aumento nos teores de Ca e Mg no solo e com a redução no teor de Al (FAGERIA, 2002b). Com o aumento no pH do solo, houve um aumento no número de vagens por planta e no número de grãos por vagem (FAGERIA; SANTOS, 2008), que podem ter contribuído para o aumento da produtividade. O aumento no pH pode ter aumentado a

mineralização da matéria orgânica, a qual incrementou a disponibilidade de N para as plantas e, conseqüentemente, aumentou a produtividade (FAGERIA, 2008b).

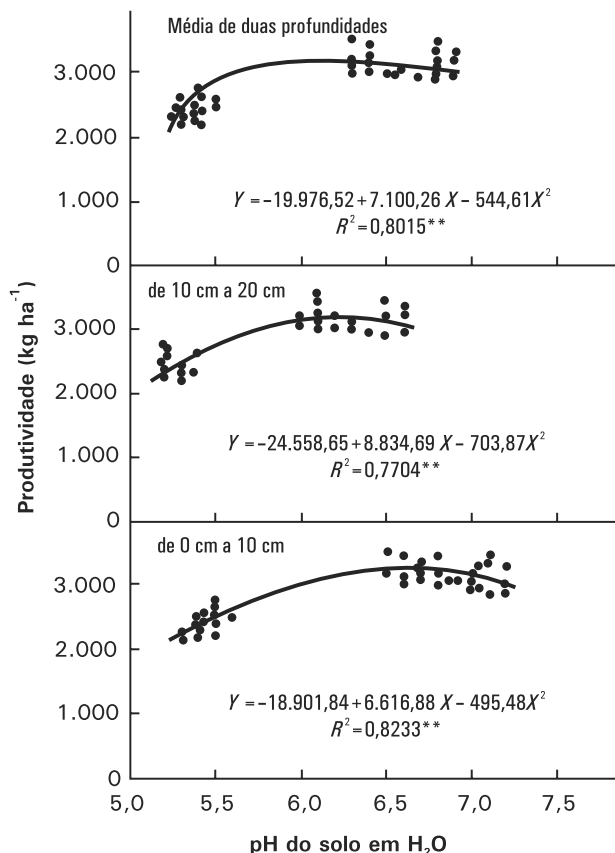


**Figura 6.** Relação entre o pH do solo e a produtividade do feijoeiro em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2008b).

### Saturação por bases

A saturação por bases, outra propriedade química do solo importante para a produção das culturas, pode ser definida como a proporção da capacidade de troca de cátions (CTC) que envolve bases trocáveis

(K, Ca, Mg e Na). A partir dos dados da análise química do solo, calcula-se a porcentagem de saturação por bases pela seguinte fórmula:

$$\text{Saturação por bases} = \sum (\text{Ca, Mg, K, Na/CTC}) \times 100$$

Se a metade da CTC estiver ocupada por bases trocáveis, a saturação por bases será de 50%. Os outros 50% serão ocupados por H e Al trocáveis. A baixa saturação por bases é uma característica dos solos ácidos, enquanto a alta saturação por bases é uma característica de solos de levemente ácidos a alcalinos. Uma classificação arbitrária da saturação por bases para a produção das culturas é dada por Fageria et al. (1999) como: muito baixa (< 25%), baixa (de 25% a 50%), média (de 50% a 75%) e alta (> 75%). Esses são valores aproximados, uma vez que os valores reais variam entre as espécies e mesmo entre as cultivares de uma mesma espécie. Os valores adequados para cada cultura devem ser determinados experimentalmente em cada região agroclimática. Quando a saturação por bases é baixa, há predominância de H e Al adsorvidos no complexo de troca e probabilidade de ocorrer deficiência de Ca, Mg e K. Além disso, para se obter uma ótima produção, deve haver um equilíbrio apropriado entre os diferentes cátions básicos.

A relação entre a saturação por bases e a produtividade do feijoeiro cultivado em sistema de plantio direto em solo de Cerrado é apresentada na Figura 7. A produtividade do feijoeiro aumentou significativamente de maneira quadrática com o aumento da saturação por bases na faixa de 20% a 80%, na profundidade de 0 a 10 cm, e na faixa de 20% a 70%, na profundidade de 10 cm a 20 cm. As produtividades máximas foram obtidas com a saturação por bases de 73%, na profundidade do solo de 0 a 10 cm, e de 62%, na profundidade de 10 cm a 20 cm. Na média das duas profundidades, a produção máxima do feijoeiro foi obtida com a saturação por bases de 67% (Figura 7). O aumento da produtividade do feijoeiro resultante do aumento da saturação por bases está associado com o equilíbrio apropriado de cátions no solo (FAGERIA, 2002). Os teores de cátions básicos são baixos em solos ácidos de climas tropicais e subtropicais, e a calagem é a prática mais efetiva para melhorar os seus teores nesses solos (DIEROLF et al., 1997).

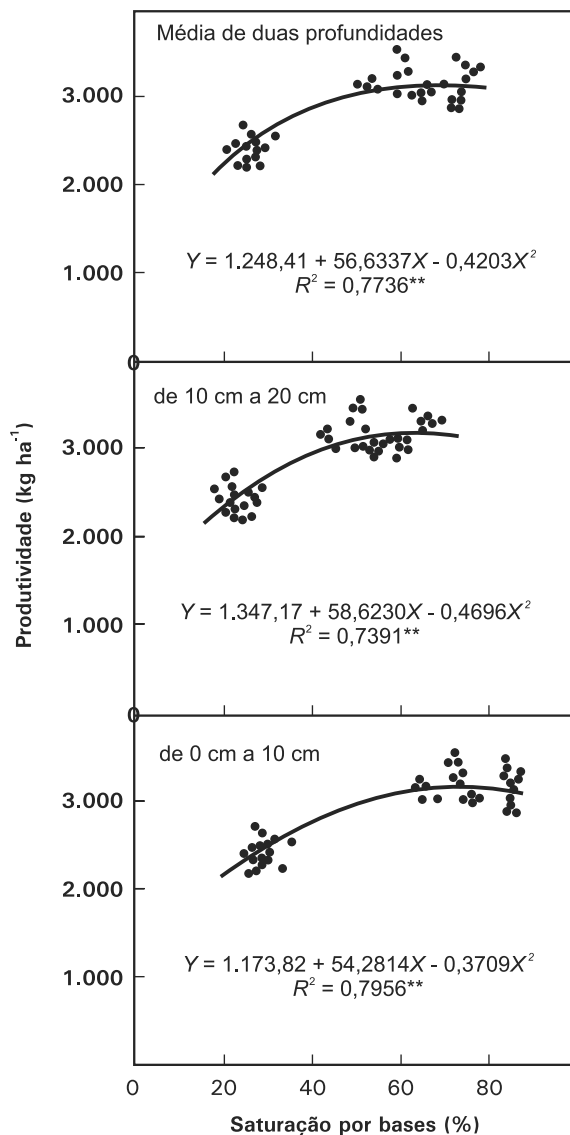


**Figura 7.** Relação entre a saturação por bases e a produtividade do feijoeiro.

**\*\*** Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2008b).



### Saturações por cálcio e por magnésio

As saturações por Ca e por Mg são importantes índices de acidez do solo. Seus valores adequados são necessários para aumentar a produtividade das culturas (FAGERIA, 2008b) e variam de espécie para espécie e entre cultivares de mesma espécie (FAGERIA et al., 1999). As respostas do feijão cultivado em sistema de plantio direto às saturações por Ca e por Mg são apresentadas nas Figuras 8 e 9. Em ambos os casos, a resposta

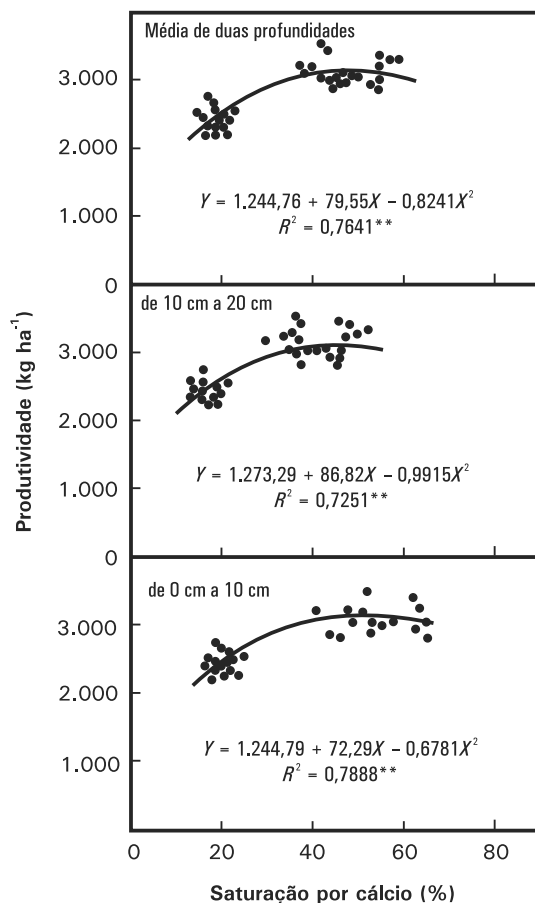


**Figura 8.** Relação entre a saturação por cálcio (Ca) e a produtividade do feijoeiro cultivado em sistema de plantio direto em solo de Cerrado.

**\*\*** Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2001c).

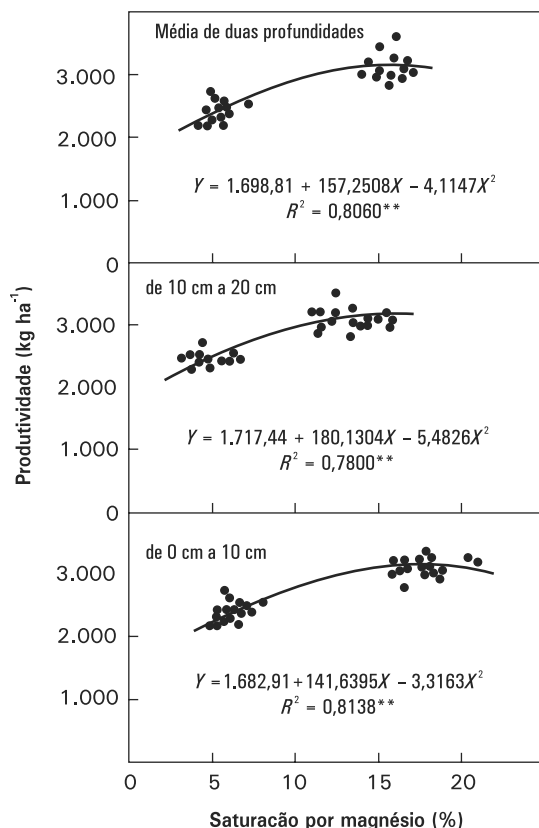


**Figura 9.** Relação entre a saturação por magnésio (Mg) e a produtividade do feijoeiro cultivado em sistema de plantio direto em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2001c).

foi significativa e quadrática. A produtividade do feijoeiro aumentou com o aumento da saturação por Ca na faixa de 20% a 60%, na camada de 0 a 10 cm de profundidade do solo. A produtividade máxima nessa camada do solo foi obtida com a saturação por Ca de 53%. Na camada de 10 cm a 20 cm de profundidade, a produtividade máxima foi obtida com a saturação por Ca de 44% e, na média das duas profundidades, a produtividade máxima do feijoeiro foi obtida com a saturação por Ca de 48%. Fageria (2001b) relatou que a saturação por Ca adequada para feijão em solo de Cerrado situa-se em torno de 37% em sistema convencional

de plantio. Porém, Eckert (1987) relatou que a saturação por Ca para a maioria das culturas está em torno de 65%.

A produtividade do feijoeiro aumentou significativamente e de maneira quadrática com o aumento da saturação por Mg na faixa de 5% a 20%, na camada de 0 a 10 cm, e de 3% a 15%, na camada de 10 cm a 20 cm (Figura 9). A produtividade máxima foi obtida com a saturação por Mg de 21%, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, e de 16%, na camada de 10 cm a 20 cm. A produtividade máxima do feijão na média das duas profundidades do solo foi obtida com a saturação por Mg de 19%. Fageria (2001b) relatou que, para o feijoeiro, a saturação por Mg ótima está em torno de 16% em solo de Cerrado. Eckert (1987) fez revisão de vários trabalhos e relatou que a saturação por Mg na faixa de 10% a 15% é suficiente para a maioria das culturas.

### **Saturação por potássio**

A produtividade do feijoeiro aumentou linearmente com o aumento da saturação por K na faixa de 1% a 3% (Figura 10), na média de duas camadas de solo (de 0 a 10 cm e de 10 cm a 20 cm). Isso significa que a saturação por bases nessa faixa não foi suficiente para resultar em produtividade máxima do feijoeiro no solo em questão. Fageria (2001c) mencionou que a produtividade máxima do feijoeiro em solo de Cerrado foi obtida com a saturação por K de 16%. Eckert (1987) relatou que a saturação por K para várias culturas estava na faixa de 2% a 5%.

### **Saturação por alumínio**

A saturação por Al é outro índice de acidez que é muito usado na expressão da toxicidade de Al para as plantas nos solos ácidos, que, em grau severo, é associada à redução do crescimento do sistema radicular. O Al interfere na divisão das células das raízes, fixa o P no solo ou nas raízes das plantas, diminui a respiração das raízes, interfere em certas enzimas que controlam a deposição de polissacarídeos nas paredes das células, aumenta a rigidez das paredes celulares pela ligação com pectinas e interfere na absorção, transporte e utilização de vários nutrientes e de água (FAGERIA et al., 1988, 1999). Observa-se, na Figura 11, que a produtividade do feijoeiro em solo de Cerrado diminuiu linearmente com o aumento da saturação por Al na faixa de 0 a 6%, na camada superficial do solo (de 0 a 10 cm), e na faixa de 0 a 10%, na camada de 10 cm a 20 cm de profundidade. Da mesma maneira, em solo de várzea,

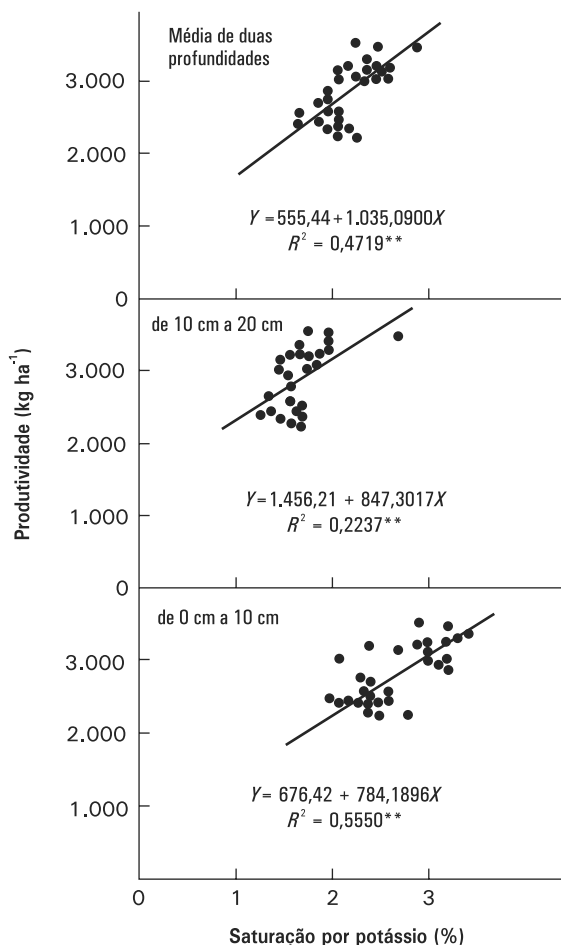


**Figura 10.** Relação entre a saturação por potássio (K) e a produtividade do feijoeiro cultivado no sistema de plantio direto em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2001c).

também diminuiu a produção relativa de grãos do feijoeiro. Porém, a produção relativa de arroz aumentou na mesma faixa de saturação por Al (Figura 12). Isso significa que existe diferença significativa entre espécies com relação à sua tolerância à toxicidade de Al.

Para quantificar a toxicidade de Al nas plantas, considera-se a porcentagem de saturação por Al um índice melhor do que o Al trocável

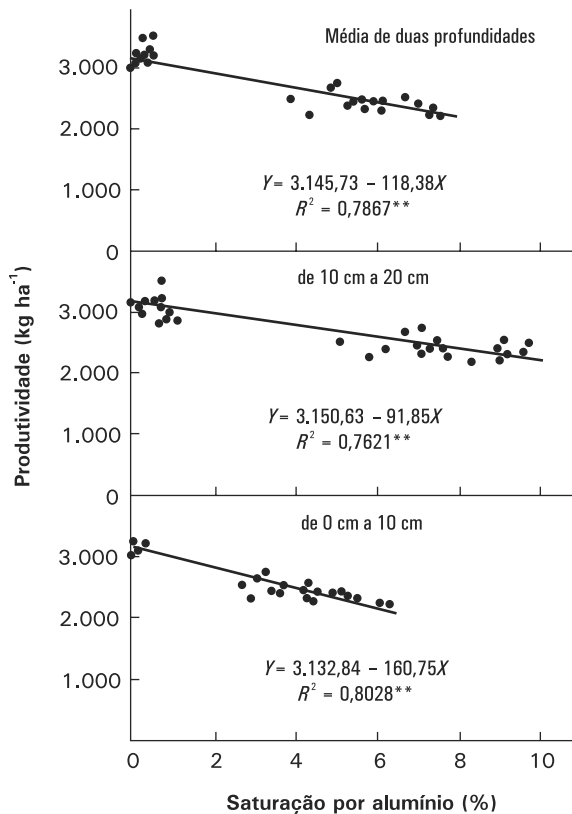


**Figura 11.** Relação entre a saturação por alumínio (Al) e a produtividade do feijoeiro cultivado em sistema de plantio direto em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2008b).

(FARINA; CHANNON, 1991). A saturação por Al é calculada pela seguinte fórmula:

$$\text{Saturação por alumínio (\%)} = [Al^{3+} / \sum(Ca, Mg, K, Al) \times 100]$$

O nível crítico de saturação por Al varia conforme a espécie e a cultivar (Tabela 7). Cochrane et al. (1985) classificaram a porcentagem de toxicidade por Al quanto ao crescimento das culturas anuais: de 0 a 10% (baixa); de 10% a 40% (média); de 40% a 70% (alta); e > 70% (muito alta). A variação no teor de matéria orgânica, especialmente a

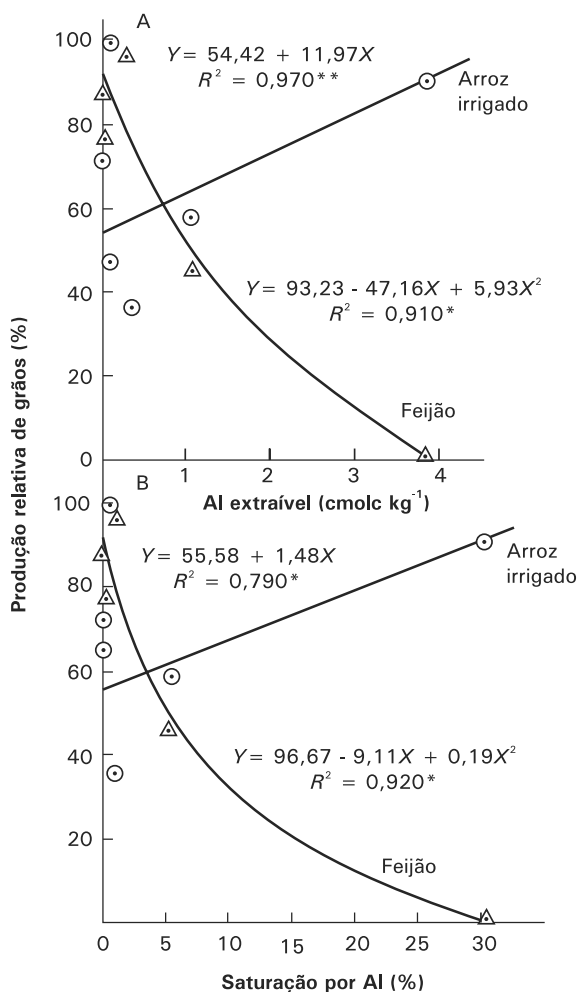


**Figura 12.** Influência do alumínio (Al) extraível e da saturação por alumínio nas produções relativas de arroz e feijão em solo de várzea.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (1998).

que é solúvel, leva a uma variação no grau de complexação do Al na solução do solo e pode causar grande variação na fitotoxicidade do Al em diferentes solos (FAGERIA et al., 1999). Sob pH 5, o nível de Al na solução de solos orgânicos é consideravelmente mais baixo do que o

nível em solos minerais (FAGERIA et al., 1999). Isso provavelmente deve-se à formação de complexos estáveis de Al com a matéria orgânica, com baixa solubilidade (FAGERIA et al., 1999).

**Tabela 7.** Níveis críticos de saturação por alumínio para várias culturas anuais para obtenção de 90% a 95% da produtividade máxima.

| Cultura               | Solo               | Nível crítico de saturação por Al |
|-----------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Mandioca              | Oxissolo/Ultissolo | 80                                |
| Arroz de terras altas | Oxissolo/Ultissolo | 70                                |
| Feijão-caupi          | Oxissolo/Ultissolo | 55                                |
| Amendoim              | Oxissolo/Ultissolo | 65                                |
| Soja                  | Oxissolo/Ultissolo | 15                                |
| Milho                 | Oxissolo           | 19                                |
| Mungo-verde           | Oxissolo           | 5                                 |
| Sorgo                 | Oxissolo           | 20                                |
| Feijão                | Oxissolo           | 10                                |
| Algodão               | -                  | < 10                              |

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1997a).

## RECOMENDAÇÕES DE CALAGEM

A calagem é a prática mais comum e mais efetiva na correção da acidez do solo. A calagem muda o ambiente químico em torno do sistema radicular. Com a dissolução do calcário, o Al e o H<sup>+</sup> são trocados por Ca, e aumenta o Ca permutável. Produz-se, portanto, aumento na percentagem de saturação por bases, enquanto eleva-se o pH da solução do solo. Existem vários métodos para estimar a *necessidade de calcário* em solos tropicais. A equação apresentada a seguir, publicada por Cochrane et al. (1980), determina a necessidade de calagem levando em conta a tolerância da cultura ao Al e os níveis de Ca e Mg no solo:

$$\text{Necessidade de calcário (equivalente a t de CaCO}_3\text{/ha)} = 1,8 [\text{Al-NCSA (Al + Ca + Mg)/100}]$$

em que

Al, Ca, Mg são dados em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo (extrator KCl 1 N).

*NCSA* = nível crítico de saturação por Al.

No Brasil, a necessidade de calcário é determinada com base nos teores de Al, Ca e Mg do solo, usando-se a seguinte equação:

$$\text{Necessidade de calcário (t ha}^{-1}\text{)} = (2 \times \text{Al}) + [2 - (\text{Ca} + \text{Mg})]$$

em que

Al, Ca e Mg são dados em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo.

No Estado de São Paulo, para determinar a necessidade de calcário, consideram-se, muitas vezes, a textura do solo e as espécies de plantas, empregando-se a equação seguinte:

$$\text{Necessidade de calcário (t ha}^{-1}\text{)} = (Y \times \text{Al}) + [X - (\text{Ca} + \text{Mg})]$$

em que o valor de *Y* varia conforme a textura do solo:

1 para solos com textura arenosa (teor de argila < 15%)

2 para solos com textura média (teor de argila entre 15% e 35%)

3 para solos com textura argilosa (teor de argila > 35%)

e o valor de *X* é determinado com base na espécie a ser plantada:

2 para a maioria das culturas

1 para eucalipto

3 para café.

A fórmula apresentada a seguir é baseada na saturação por bases e também é empregada no Brasil para calcular a necessidade de calcário:

$$\text{Necessidade de calcário (t ha}^{-1}\text{)} = [\text{CTC} (V_2 - V_1) / 100] \times f$$

em que

*CTC* = capacidade de troca de cátions ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ), dada em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$

$V_2$  = saturação por bases adequada para uma dada cultura

$V_1$  = saturação por bases do solo

*f* = 100/ poder relativo de neutralização total do calcário a ser usado.

Suponha-se, como exemplo, um solo com valores de *CTC* de  $6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ,  $V_1 = 25\%$  e  $V_2 = 65\%$ , que exista calcário disponível com



poder relativo de neutralização total (PRNT) de 76% e que a cultura seja o feijoeiro. A quantidade de calcário necessária pode ser calculada como:  $6 (65 - 25) / 100 \times 100 / 76 = 3,2 \text{ t ha}^{-1}$ .

Para os Oxissolos brasileiros, a saturação por bases adequada para a maioria dos cereais está em torno de 50% a 60% e, para a maioria das leguminosas, de 60% a 70% (FAGERIA et al., 1999). Para utilizar a última equação citada, é preciso estimar o teor de Al, Ca, Mg, K e H da área que receberá a calagem. Além disso, para determinar a necessidade de calcário para os solos ácidos, devem ser considerados os seguintes fatores: textura do solo, fertilização nitrogenada, remoção pelas culturas, nível de pH desejado, qualidade do calcário e aspectos econômicos.

### **Textura do solo**

Solos arenosos necessitam de menos calcário do que os argilosos. Pelos gráficos que compõem a Figura 13, é possível entender melhor a importância da textura do solo para a determinação da necessidade de calcário. O solo de Guapó, GO, que tem 52% de areia, requer 8 g de calcário dolomítico por 5 kg de solo para elevar o pH a 6. Já o solo de Itumbiara, GO, que possui somente 5,5% de areia (Tabela 8), necessita de 15 g de calcário por 5 kg de solo para elevar o pH ao mesmo nível. Além da textura, outros fatores, como o pH inicial e os teores de Ca, Mg e Al, são responsáveis por essa discrepância. Portanto, todos esses fatores devem ser levados em consideração para determinar a necessidade de calcário.

### **Fertilização nitrogenada**

Altas doses de fertilizantes amoniacais podem gerar acidez considerável.

### **Remoção pelas culturas**

As leguminosas geralmente removem quantidade maior de Ca e Mg do que os cereais.

### **Nível de pH desejado**

A quantidade de calcário também depende do nível de pH desejável, que, por sua vez, depende da cultura a ser plantada.

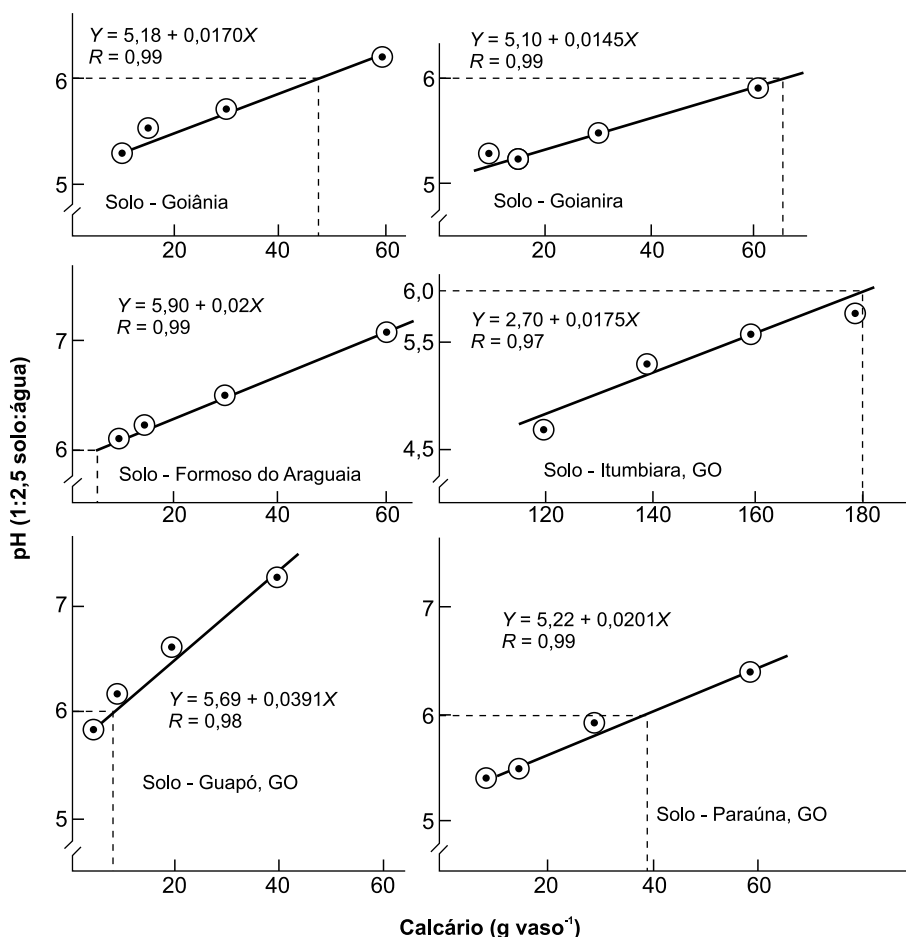


**Figura 13.** Relação entre o calcário aplicado e o pH em solo glei húmico dos estados de Goiás e Tocantins.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1999).

## Qualidade do calcário

A qualidade do calcário é determinada pelo seu PRNT, pela sua granulometria e pela mineralogia. Existem três maneiras de avaliar essas características: observação do efeito da calagem na produtividade das culturas, determinação da mudança de pH do solo e medição do carbonato não reagente em vários intervalos de tempo após a aplicação do calcário.

**Tabela 8.** pH e propriedades granulométricas de solos de várzea dos estados de Goiás e Tocantins.

| Local                   | pH em H <sub>2</sub> O | Areia (g kg <sup>-1</sup> ) | Silte (g kg <sup>-1</sup> ) | Argila (g kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Goiânia, GO             | 5,2                    | 348                         | 245                         | 405                          |
| Goianira, GO            | 5,0                    | 467                         | 195                         | 335                          |
| Formoso do Araguaia, TO | 5,6                    | 400                         | 235                         | 365                          |
| Itumbiara, GO           | 3,6                    | 55                          | 355                         | 590                          |
| Guapó, GO               | 5,7                    | 520                         | 225                         | 250                          |
| Paraúna, GO             | 5,1                    | 100                         | 210                         | 690                          |

Fonte: Fageria et al. (1999).

Stevens e Blanchar (1992) utilizaram microeletrodos de vidro para a medição de pH na avaliação da reatividade do calcário no solo. Esses autores investigaram os efeitos da granulometria, da mineralogia e da lixiviação pela água sobre a quantidade de carbonato não reagente e o pH do solo em torno das partículas de calcário. Os resultados mostraram que a taxa de reação é uma função linear da superfície total da partícula e que o calcário calcítico reagiu cerca de duas vezes mais rápido do que o calcário dolomítico, quando foram comparados em uma base de superfície igual.

Os materiais usados para calagem diferem em sua composição, sendo necessário submetê-los a análises químicas. É recomendável utilizar materiais que contenham tanto Ca como Mg. O tamanho das partículas do calcário indica a sua taxa de reação com o solo. Quanto maiores forem as partículas, mais lento será o seu efeito de neutralização da acidez. A legislação brasileira exige que 100% do calcário passe em peneira nº 10 (2 mm) e 50% em peneira nº 50 (0,30 mm). O PRNT do calcário indica seu potencial relativo para corrigir (neutralizar) a acidez. Quanto mais baixo for o PRNT, maior será a quantidade de calcário necessária. Quanto maiores forem os teores de CaO e MgO (na forma de carbonatos) apresentados pelo calcário, maior será a sua eficiência na correção da acidez. Assim, é evidente que um calcário que possua impurezas (sílica e argila) terá o seu poder neutralizante diminuído proporcionalmente ao teor delas. A classificação dos calcários com base nos teores de CaO e MgO é apresentada na Tabela 9.

**Tabela 9.** Classificação dos calcários com base nos teores de CaO e MgO.

| Classificação | Teor de CaO (%) | Teor de MgO (%) |
|---------------|-----------------|-----------------|
| Calcítico     | 40–45           | 1–5             |
| Magnesiano    | 31–39           | 6–12            |
| Dolomítico    | 25–30           | 13–20           |

Fonte: Fageria et al. (1999).

O efeito residual do calcário é de longa duração, mas não é permanente. A aplicação de fertilizantes que provocam acidez e decomposição da matéria orgânica abaixam o pH e liberam mais Al. O efeito do calcário, contudo, tem maior duração do que o de outros corretivos. Em geral, se for aplicado o nível adequado, não será necessário reaplicar o calcário antes de 3 anos de cultivo. O efeito residual dos materiais com granulometria mais grosseira é mais longo do que o dos materiais mais finos (CAUDLE, 1991).

### Aspectos econômicos

Para determinar a dose de calcário a ser aplicada, deve ser levado em consideração o fator econômico, especialmente o valor do aumento da produção em relação ao custo do calcário.

## RESPOSTA DAS CULTURAS AO CALCÁRIO

Existem vários critérios de recomendação de calcário. Entretanto, os dados relacionados à resposta das culturas à aplicação de calcário é o melhor parâmetro para se fazer recomendações. No Brasil, existem dados suficientes de respostas das culturas à calagem em solos de Cerrado, mas são poucos os dados sobre esse assunto para solos de várzea.

Na Figura 14, é apresentada a resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solo de Cerrado. A resposta foi linear na faixa de 0 a 12 t de calcário ha<sup>-1</sup>. A cultivar Carioca apresentou maior produtividade de grãos em comparação à cultivar EMGOPA 201. Fageria (2001a) relatou que a produtividade do feijoeiro apresentou resposta quadrática à aplicação de calcário. O nível econômico (90% da produção máxima) foi obtido com 5 t de calcário ha<sup>-1</sup>.

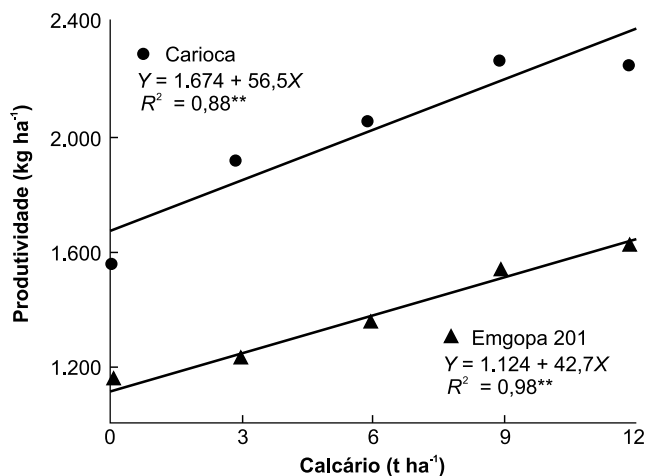


**Figura 14.** Resposta de cultivares de feijoeiro à aplicação de calcário em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1999).

Na Figura 15, são apresentados dados da resposta do feijoeiro à aplicação de calcário em solo de várzea. A resposta foi significativa e quadrática na faixa de 0 a 20 t de calcário ha<sup>-1</sup>. A dose econômica (90% da produção máxima) foi obtida com 3,2 t ha<sup>-1</sup>. A produção do feijoeiro aumentou em 12% em relação à testemunha com aplicação dessa mesma dose.

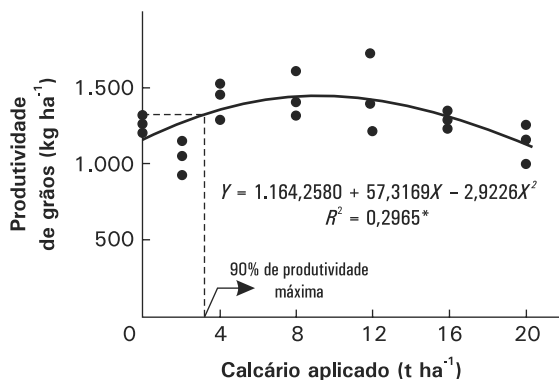


**Figura 15.** Relação entre doses de calcário e produtividade de grãos do feijoeiro em solo de várzea.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

Fageria e Baligar (1999) relataram resposta significativa do feijoeiro à aplicação de calcário em solo de várzea. Kluthcouski e Aidar (2002) relataram que os solos de várzeas tropicais são, em sua grande maioria, ácidos e pobres na maioria dos macro e em alguns dos micronutrientes. Assim, para obter altas produções, faz-se necessário utilizar quantidades razoáveis de corretivos de acidez e de fertilizantes minerais. Oliveira e Santos (2002) relataram que a faixa de pH mais adequada para o desenvolvimento do feijoeiro situa-se entre 5,7 a 6,2, considerada acidez de média a fraca. Esses autores relataram também que o teor de Al maior do que  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  reduz a produtividade do feijoeiro. Nesse estudo, inicialmente, o pH da área experimental era de 4,9, o que representa acidez muito alta, e o teor de Al estava em  $2,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Rosolem (1996) mencionou que o cultivo do feijoeiro deve ocorrer em solos com pH em água na faixa de 6,0 a 6,5. Segundo esse autor, nessa faixa de pH, a fixação simbiótica do  $\text{N}_2$  é mais eficiente, e a fitotoxicidade do Al e Mn é nula, o que permite maior desenvolvimento do sistema radicular e torna a planta mais apta para produzir em condições de deficit hídrico. Fageria e Stone (1999) constataram que o sistema radicular do feijoeiro aumentou até o pH atingir 5,9, por causa do efeito da calagem e da aplicação de P, o que proporcionou maior absorção de nutrientes e água do solo. Silva et al. (2004) relataram que a calagem promove aumento do sistema radicular e da parte aérea das cultivares de feijoeiro.

Os componentes da produtividade que contribuem para o seu aumento são o número de vagens por planta, a massa de 100 grãos e o número de grãos por vagem (FAGERIA et al., 2004). A relação entre a calagem e esses componentes mostrou que os três aumentaram de maneira quadrática com o aumento das doses de calcário (Tabela 10). Porém, o efeito significativo do calcário foi somente no aumento (de 33%) do número de vagens. A massa de 100 grãos variou 26%. Isso significa que o maior aumento na produtividade de grãos deveu-se ao aumento do número de vagens, seguido pelo da massa de 100 grãos. O número de vagens por planta apresentou associação altamente significativa ( $P < 0,01$ ) e linear com a produtividade do feijoeiro (FAGERIA et al., 2004).

Raij e Quaggio (1997) calcularam as doses econômicas de calcário para várias culturas anuais plantadas em solo de Cerrado. De acordo com esses autores, as doses econômicas foram  $9 \text{ t ha}^{-1}$  para milho,  $5,5 \text{ t ha}^{-1}$  para soja,  $6 \text{ t ha}^{-1}$  para algodão,  $6,5 \text{ t ha}^{-1}$  para feijão e  $4 \text{ t ha}^{-1}$  para cana-de-açúcar.

**Tabela 10.** Relação entre dose de calcário (X) e componentes da produtividade (Y) do feijoeiro em solo de várzea. Os valores são médias de 2 anos de ensaios de campo.

| Variável                                                    | Equação de regressão                    | R <sup>2(1)</sup>    |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| Dose de calcário (X) versus número de vagens por planta (Y) | $Y = 4,9905 + 0,15866 X - 0,00459 X^2$  | 0,3338*              |
| Dose de calcário (X) versus número de grãos por vagem (Y)   | $Y = 4,8758 + 0,04964 X - 0,00321 X^2$  | 0,0296 <sup>ns</sup> |
| Dose de calcário (X) versus massa de 100 grãos (Y)          | $Y = 18,6223 + 0,40110 X - 0,01979 X^2$ | 0,2636 <sup>ns</sup> |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria et al. (2004).

A resposta das culturas ao calcário está relacionada com a redução dos efeitos da acidez do solo, como o aumento da disponibilidade de Ca, Mg e P e a redução da toxicidade de Al e Mn. Além disso, as culturas podem ser beneficiadas pela melhoria das condições físicas e biológicas do solo com a aplicação de calcário. A magnitude da resposta das culturas depende, portanto, da intensidade desses fatores adversos, bem como da espécie e da cultivar. Kamprath (1984) e Pearson (1975) fizeram uma revisão de literatura sobre a resposta das culturas à calagem em solos tropicais, cujo resumo é apresentado nesta seção, junto com resultados de alguns outros estudos recentes:

- Feijão-comum: respondeu à calagem. Essa resposta parece estar relacionada com a eliminação da toxicidade de Al e Mn e o fornecimento de Ca, que promovem um ambiente favorável para a fixação biológica de N.
- Milho: respondeu à calagem quando o pH do solo foi menor do que 5 e a saturação por Al<sup>3+</sup> maior do que 15%.
- Sorgo: respondeu mais ou menos como o milho, embora necessite de pH mais alto do que o milho.
- Soja: respondeu à aplicação de calcário em solos de moderada a altamente ácidos. A resposta ocorreu quando a saturação por

Al foi maior do que 10%. O aumento na produtividade, em solo com pH maior do que 5,5, pode ter sido ocasionado pela maior disponibilidade de Mo.

- Amendoim: respondeu à calagem, quando plantado em solos altamente lixiviados, com baixa capacidade-tampão, graças ao fornecimento de calcário e ao aumento da disponibilidade de Mo.
- Algodão: respondeu à calagem em Oxisolos do Brasil com saturação por Al na faixa de 45% a 85%. Em Uganda, quando o pH era maior do que 5,2, não se obteve resposta.
- Batata-doce, cana-de-açúcar e capim-elefante: responderam na medida em que houve a redução da saturação por Al. Em Porto Rico, a produtividade máxima de batata-doce foi obtida quando a saturação por Al era menor do que 20%.
- Feijão-caupi: respondeu a pequenas quantidades de calcário. Na Colômbia, com a aplicação de 0,5 t de  $\text{CaCO}_3 \text{ ha}^{-1}$  em um Oxisolo com pH 4,2 e saturação por Al de 78%, a produtividade dobrou, a saturação por Al foi reduzida a 67% e a saturação por Ca foi de 22%.

## GESSO

O gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – sulfato de cálcio), um subproduto da indústria de ácido fosfórico, é um corretivo para a acidez do solo. É largamente disponível em muitas partes do mundo, inclusive no Brasil, onde cerca de 4,5 milhões de toneladas são produzidas anualmente (VITTI, 2000). A eficiência do gesso na melhoria dos efeitos da acidez no subsolo tem sido demonstrada em vários trabalhos (CAIRES et al., 2004; CARVALHO; RAIJ, 1997; MARSH; GROVE, 1992; OATES; CALDWELL, 1985). O gesso não neutraliza os íons  $\text{H}^+$ , mas precipita o Al e fornece Ca e S como nutrientes. A lixiviação de Ca na camada subsuperficial (abaixo de 20 cm) ocorre junto com a do sulfato, o que leva à precipitação do Al do subsolo e ao aumento da possibilidade de o sistema radicular das plantas se desenvolver em profundidade (PAVAN; BINGHAM, 1982; SUMNER et al., 1990), o que ajuda na maior absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas (CARVALHO; RAIJ, 1997; SUMNER et al., 1986). Um dos pontos importantes da absorção de  $\text{SO}_4^{2-}$  é a liberação de  $\text{OH}^-$ , que reduz a acidez do meio. É um aspecto ainda controverso, mas existem



evidências de que seria um mecanismo possível em solos ricos em óxidos de Fe e Al e, principalmente, nos subsolos ácidos. Esse processo foi sugerido por Reeve e Sumner (1972) e denominado de autocalagem, em que os hidróxidos promoveriam a neutralização do Al.

De acordo com Sousa et al. (2004), 86% das áreas agricultáveis do Cerrado apresentam, em sua subsuperfície, um teor de Ca inferior a  $0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo. Nessa situação, o sistema radicular das culturas não se desenvolve na camada subsuperficial e diminui a absorção de água e nutrientes. Se ocorrer veranico na fase crítica da planta, ao redor da floração, o efeito na produção é mais marcante. Sousa et al. (2004) desenvolveram uma fórmula para recomendação de gesso:

$$\text{Necessidade de gesso (kg ha}^{-1}\text{)} = 50 \times \text{teor de argila (\%)}$$

O gesso agrícola deve possuir 15% de S, e o teor de argila a ser incluído no cálculo deve ser o da camada subsuperficial, ou seja, das profundidades de 20 cm a 40 cm ou de 40 cm a 60 cm. Se existirem dados de textura do solo, as recomendações de gesso podem ser feitas pelos seguintes critérios:

- Para solo arenoso (< 15% de argila), usar 700 kg de gesso  $\text{ha}^{-1}$ .
- Para solo de textura média (de 15% a 35% de argila), usar 1.200 kg de gesso  $\text{ha}^{-1}$ .
- Para solo de textura argilosa (de 35% a 60 % de argila), usar 2.200 kg de gesso  $\text{ha}^{-1}$ .
- Para solo muito argiloso (> 60% de argila), usar 3.200 kg de gesso  $\text{ha}^{-1}$ .

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A acidez do solo é um importante fator limitante à produção do feijoeiro nos solos de Cerrado e de várzea do Brasil. Para incorporação desses solos ao processo produtivo, é indispensável o uso adequado de corretivos (como calcário e gesso), a adoção de outras práticas de manejo (como uso de espécies ou cultivares tolerantes à acidez do solo), a reciclagem dos restos culturais e o uso de adubação verde e orgânica. Teoricamente, a acidez é caracterizada pelos teores de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  no solo, mas, na prática, é o resultado de um complexo de vários fatores, incluindo as deficiências e/ou toxicidades nutricionais, a redução da atividade microbiana benéfica para as plantas e a erosão do solo. Além disso, a

acidez propicia o aumento da incidência de doenças, principalmente das causadas por fungos, que prejudicam o crescimento das plantas.

Entre as várias práticas de manejo dos solos ácidos, o uso de calcário no momento é a mais comum e a mais efetiva. Na prática da calagem, vários fatores devem ser levados em consideração, como as necessidades do solo, o pH, a textura e o teor de matéria orgânica do solo. Além desses, outros fatores devem ser considerados, como a granulometria do calcário, o tempo e a frequência de calagem e, finalmente, o custo do material usado para calagem. Níveis adequados de pH, saturação por bases, saturação por Al e doses adequadas de calcário para a cultura do feijoeiro em solos de Cerrado e várzea foram estabelecidos. Esses índices podem ser usados para identificação do grau de acidez nos solos de Cerrado e várzea do Brasil e, conseqüentemente, para a sua correção. Outra prática eficiente é o uso de espécies ou de cultivares tolerantes à acidez. Entretanto, nesse sentido, são necessários mais trabalhos de pesquisa para incorporar a tolerância em cultivares produtivas e/ou adaptáveis às condições ácidas do solo.



## Capítulo 4

# Nitrogênio

## INTRODUÇÃO

Para conservação e sustentabilidade da produtividade das culturas, o manejo apropriado da fertilidade é uma prática importante. A adubação nitrogenada está entre as técnicas de manejo necessárias para atingir alto potencial produtivo nos sistemas agrícolas, pois as plantas geralmente absorvem grande quantidade de N. Na agricultura intensiva, o nitrogênio (N) é, entre os essenciais, o nutriente mais importante para o crescimento e a determinação do potencial produtivo das culturas e o mais demandado pelo metabolismo das plantas (promove a rápida expansão da folha) (FAGERIA; BALIGAR, 2005a). No entanto, seu uso indiscriminado pelos agricultores, na tentativa de não reduzir a produtividade e, consequentemente, seus lucros faz com que aumentem os riscos de contaminação ambiental. A produtividade da maioria dos ecossistemas, inclusive agroecossistemas, é limitada pela disponibilidade de N: já que os solos contêm relativamente pequena quantidade desse elemento, poucos são os que podem sustentar uma produção satisfatória sem a aplicação de N. Portanto, a deficiência de N é bastante frequente em comparação com a de outros nutrientes. A maior parte do N permanece na forma orgânica no solo, e grande parte fica na camada superficial do solo. A matéria orgânica possui, em média, 50 g de N kg<sup>-1</sup> (BARBER, 1995). Assim, a aplicação de N torna-se fundamental como fertilizante para se obter maior produtividade (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2006a).

A carência de N é um dos fatores que mais limitam a produtividade do feijoeiro em solos tanto de Cerrado quanto de várzeas do Brasil (BARBOSA FILHO; SILVA, 2000; FAGERIA, 2014; FAGERIA et al. 2013; FAGERIA; SANTOS, 2008; SANTOS et al., 2003). Vários trabalhos demonstraram que a cultura responde à aplicação de fertilizantes nitrogenados (CARVALHO et al., 2003; KANEKO et al., 2010; PELEGRIN et al., 2009; SANTOS et al., 2003; SILVEIRA et al., 2005; SOUZA et al., 2011). Caballero et al. (1985), Mercante et al. (1999) e Pelegrin et al. (2009) relataram que, entre os principais fatores limitantes da produtividade da cultura do feijoeiro no País, destacam-se aqueles relacionados ao baixo nível tecnológico empregado pelos produtores e ao cultivo do feijoeiro em solos de baixa fertilidade, especialmente pobres em N. Barbosa Filho e Silva (1994), Silva e Silveira (2000) e Stone e Moreira (2001) verificaram efeito positivo do fertilizante nitrogenado sobre essa leguminosa, que chegou a responder a doses acima de 100 kg de N ha<sup>-1</sup>. Oliveira et al.

(1996) também relataram que quantidade superior a 100 kg de N ha<sup>-1</sup> é requerida para garantir o uso do nutriente pelas plantas e, assim, gerar altas produtividades. Apesar da fixação do N<sub>2</sub> atmosférico pela simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, mesmo quando é realizada inoculação, a quantidade do nutriente suprida por esse processo tem sido insuficiente (BASSAN et al., 2001; LEMOS et al., 2003), sendo a adubação nitrogenada quase sempre recomendada para atender às exigências da cultura (AMBROSANO et al., 1996; CRUSCIOL et al., 2007).

A deficiência de N na cultura do feijoeiro, causada pela perda desse nutriente por vários processos no sistema solo-planta, como lixiviação, desnitrificação, volatilização e erosão do solo, é frequentemente observada. A maximização do uso de N pelo feijoeiro é importante sob os pontos de vista econômico e ambiental, pois esse nutriente apresenta risco ao meio ambiente por ser potencialmente contaminante do lençol freático. Portanto, neste Capítulo, é discutido o manejo adequado de N na produção do feijoeiro nos solos de Cerrado e várzeas do Brasil.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O ciclo do N consiste na sequência de mudanças bioquímicas que incluem a translocação, transformação, absorção, utilização, fixação, perda e reposição desse elemento no sistema solo-planta (Figura 1). Todos esses processos são dinâmicos no sistema e, portanto, a sua avaliação e quantificação são muito complexas e difíceis. No solo, o N existe predominantemente na forma orgânica (de 95% a 99%) (BRADY; WEIL, 2002; FAGERIA; BALIGAR, 2005a). Uma pequena parte do N total do solo encontra-se na forma mineral como amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). A forma orgânica, o amônio e o nitrato no solo estão sujeitos à mineralização ou amonificação (NH<sub>3</sub> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitrificação (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), imobilização pelos microrganismos (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), absorção pelas plantas (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), fixação pelos minerais das argilas (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e perdas por volatilização (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), lixiviação (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e desnitrificação (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Esses são os principais componentes do ciclo de N e, portanto, são importantes as suas definições.

### Mineralização

A mineralização é o processo de conversão do N orgânico na forma mineral por meio de organismos heterotróficos, como bactérias, fungos e

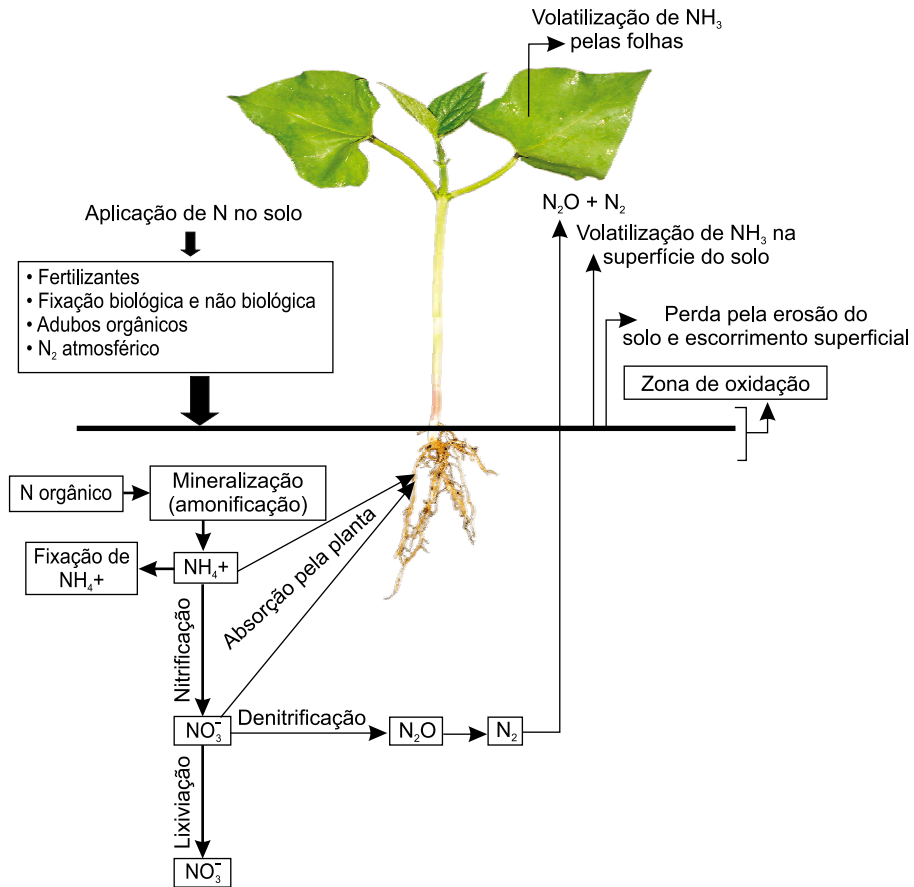
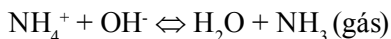


**Figura 1.** Ciclo do nitrogênio (N) no sistema solo-planta.

Ilustração: Sebastião Araújo

actinomicetos. Na maioria dos solos minerais drenados, aproximadamente 2% do N orgânico é mineralizado anualmente (FOTH; ELLIS, 1988). Por exemplo, um solo com 0,05% a 0,10% de N pode mineralizar de 25 kg de N  $ha^{-1}$  a 50 kg de N  $ha^{-1}$  na camada de até 20 cm de profundidade. No processo de mineralização, a amônia ( $NH_3$ ) é o primeiro produto formado e, portanto, o processo também é chamado de amonificação. A molécula de  $NH_3$  combina-se facilmente com um próton, formando  $NH_4^+$  ( $NH_3 + H^+ = NH_4^+$ ). O  $NH_4^+$  estabiliza-se nos solos ácidos, mas, nos solos alcalinos, a disponibilidade de prótons é pouca, o que faz aumentar a volatilização com o aumento do pH. A volatilização do  $NH_4^+$  segue a reação:



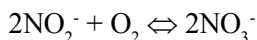
A quantidade de N mineralizada depende do teor de matéria orgânica do solo e das condições ambientais. Em condições normais, de 1% a 4% por ano do N total é mineralizado. A quantidade aproximada de N total na matéria orgânica (M.O.) pode ser estimada pela seguinte equação:

$$N (\%) = M.O. (\%)/20$$

Em solos inundados, os organismos anaeróbicos atuam, e a mineralização ocorre normalmente. Com isso, tanto em solo inundado como em solo bem drenado ocorre mineralização (FOTH; ELLIS, 1988).

## Nitrificação

O processo de nitrificação, que ocorre em duas etapas, começa com a acumulação de  $\text{NH}_4^+$  graças à mineralização no solo. Na primeira etapa, o íon  $\text{NH}_4^+$  é oxidado em nitrito pela bactéria *Nitrosomonas* e, na segunda, o nitrito é oxidado em nitrato pela bactéria *Nitrobacter*. As duas etapas de nitrificação podem ser expressas pelas seguintes reações (FAGERIA; BALIGAR, 2005a):



De acordo com a primeira equação, a nitrificação pode baixar significativamente o pH, quando é aplicada grande quantidade de fertilizante amoniacal. O íon nitrato é estável na solução do solo, porém fica solúvel e sujeito à perda por lixiviação. O processo de nitrificação é determinado por pH – valor ótimo na faixa de 6,0 a 8,0 (FOTH; ELLIS, 1988), temperatura (o processo ocorre na faixa de 5 °C a 40 °C, mas seu valor ótimo é de 25 °C a 35 °C), umidade (nos solos aeróbicos, o teor ideal é de 50% a 70% da capacidade de campo) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ) (o processo cessa na ausência desse elemento). Além disso, a atividade das bactérias nitrificadoras é sensível à presença de  $\text{H}^+$ . Portanto, a nitrificação é sensível à estrutura do solo e ao teor de umidade. Nos solos inundados, o processo de nitrificação quase cessa graças à falta de  $\text{O}_2$ , e ocorre a acumulação de  $\text{NH}_4^+$ . O processo de nitrificação nesses solos ocorre na camada superficial (atingindo apenas alguns milímetros de profundidade) por causa da difusão do  $\text{O}_2$  através da água de inundação. Portanto, nesses solos,



a forma dominante de N é o  $\text{NH}_4^+$ . O processo de nitrificação ocorre somente quando existem íons  $\text{NH}_4^+$  para oxidação. Portanto, uma alta relação C/N dos restos culturais, a qual inibe a liberação de  $\text{NH}_4^+$ , pode reduzir a nitrificação.

## Imobilização

A imobilização é o oposto da mineralização: promove a conversão de íons ( $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$ ) inorgânicos em orgânicos. Quando não existe quantidade suficiente de íons inorgânicos no solo, as bactérias que decompõem os restos culturais consomem esses íons, e as plantas podem sofrer deficiência de N. A mineralização e a imobilização podem ocorrer simultaneamente no solo. O efeito positivo ou negativo da mineralização depende da relação C/N dos resíduos orgânicos sujeitos à decomposição. Geralmente, a matéria orgânica decomposta possui relação C/N de 10 a 12 e, quando ocorre a mineralização, o excesso de N pode ser utilizado pelas plantas. Entretanto, quando a relação C/N é maior do que 30, o solo não possui N suficiente para as bactérias que mineralizam os resíduos, e o processo se inverte (FAGERIA et al., 2003b).

## Volatilização

O gás  $\text{NH}_3$  pode ser produzido no sistema solo-planta, e muito N pode ser perdido para a atmosfera dessa forma. A perda pode ser explicada pela seguinte equação:



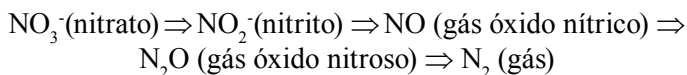
Nessa equação, a perda do gás amônia aumenta com o aumento do pH do solo. O íon amônio pode ser adsorvido pelos colóides da argila se o adubo for incorporado ao solo. Portanto, a perda pode ser diminuída com a aplicação do adubo no sulco de semeadura, em solo com alto teor de argila. Com a incorporação de adubo no solo, a perda pode ser de 25% a 75% menor do que com a prática de deixar o adubo na superfície (BRADY; WEIL, 2002). Outra prática é o uso de alguns compostos que inibem a hidrólise da ureia ou reduzem a dissociação de  $\text{NH}_4^+$  para  $\text{NH}_3$  e, dessa maneira, diminuem a perda por volatilização. Sharif Zia et al. (1997) relataram que a mistura de  $\text{CaSO}_4$  (gesso) e KCl com ureia aumentou a produtividade do arroz em 11% em comparação com a ureia sem a mistura desses produtos. Fenn et al. (1981) mostraram que a mistura de cálcio (Ca) com ureia reduz a perda de  $\text{NH}_3$ .

## Lixiviação

O nitrato formado pelo processo de nitrificação está sujeito à lixiviação em razão da ocorrência de excesso de chuvas ou de sua presença em solos de cultivo de arroz inundado. O íon  $\text{NO}_3^-$  é completamente móvel no solo junto com a água de lixiviação ou de drenagem. Experimentos de laboratório mostraram que, em solos alagados, o  $\text{NO}_3^-$  desaparece do solo após três semanas de incubação, independentemente da concentração inicial. Porém, alguns estudos mostraram que o desaparecimento do  $\text{NO}_3^-$  depende do tipo de solo.

## Desnitrificação

A perda de N para a atmosfera pela conversão de íons nitrato em uma série de reações bioquímicas de redução é chamada de desnitrificação. Esse processo é controlado principalmente por teor de matéria orgânica, pH do solo e temperatura. Os organismos responsáveis pela desnitrificação são, na maioria, bactérias facultativas anaeróbicas, como *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Micrococcus* e *Achromobacter* (BRADY; WEIL, 2002). Esses organismos são heterotróficos e adquirem sua energia do carbono (C) pela oxidação de compostos orgânicos. Outras bactérias que participam no processo de desnitrificação são autotróficas, como *Thiobacillus denitrificans* e *Thiobacillus thioparus*, que obtêm sua energia pela oxidação de sulfito. No processo de desnitrificação, o íon nitrato é reduzido em uma série de etapas, como explicado a seguir:



Os vários fatores que determinam a desnitrificação são: disponibilidade de nitrato, disponibilidade de composto orgânico para fornecer energia para os microrganismos que participam do processo, teor de  $\text{O}_2$  na solução do solo menor do que 10% (uma vez que a desnitrificação ocorre mais rapidamente na ausência total de  $\text{O}_2$ ) e temperatura na faixa de 2 °C a 50 °C (sendo ótima na faixa de 25 °C a 35 °C). A proporção de cada um dos três gases depende desses fatores de desnitrificação. Por exemplo, a liberação de  $\text{N}_2\text{O}$  é favorecida se as concentrações de nitrato e nitrato forem altas e a concentração de  $\text{O}_2$  não for muito baixa. Em condições muito ácidas, quase toda a perda de N ocorre na forma de  $\text{N}_2\text{O}$ . A perda de N por NO é muito pequena e aparentemente ocorre em condições ácidas.

A desnitrificação é um processo importante em arroz inundado, pois é o principal mecanismo de perda de N. Ainda não existem métodos que determinem a quantidade de N perdida por esse processo em condições naturais. Entretanto, um valor aproximado pode ser determinado em condições controladas usando isótopos ( $^{15}\text{N}$ ). De acordo com Fageria (1984), 40% do N aplicado são absorvidos pela planta de arroz, 20% ficam no solo e nas raízes, e os 40% restantes são perdidos. Porém, Foth e Ellis (1988) relataram que, em média, 50% do N são absorvidos pela planta, 25% são perdidos por lixiviação, desnitrificação e volatilização, e 25% ficam no solo, como N mineral ou incorporado na matéria orgânica.

Pode-se perceber que o manejo da água de inundação é fator determinante na economia e no aproveitamento do N do solo e do aplicado como fertilizante. Mesmo em solos mantidos continuamente inundados, ocorre perda de N por volatilização, pois, embora em menor escala, a nitrificação ocorre na superfície do solo (região oxidada). Quando o  $\text{N-NO}_3^-$  aí produzido é transportado para a região reduzida, sobrevém a desnitrificação. Entretanto, as perdas são bem maiores quando o solo é submetido à inundação e drenagem alternadas.

## FORMAS DE ABSORÇÃO

O N é absorvido pelas plantas principalmente nas formas  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$ . As plantas podem absorver as duas formas igualmente. Entretanto, a forma absorvida é determinada principalmente pela quantidade e pelo acesso a cada forma disponível no solo. Nos solos bem drenados, a forma  $\text{NO}_3^-$  predomina, enquanto, em condições anaeróbicas, a forma  $\text{NH}_4^+$  apresenta-se em maior quantidade. A taxa de absorção de  $\text{NH}_4^+$  é de 5 a 20 vezes maior do que a da forma  $\text{NO}_3^-$  (GAUDIN; DUPUY, 1999). Em geral, nos solos cultivados, a concentração de  $\text{NO}_3^-$  varia na faixa de 0,5 mM a 10 mM (7 ppm a 140 ppm), enquanto a concentração da forma  $\text{NH}_4^+$  é geralmente de 10 a 1.000 vezes mais baixa, chegando na faixa de milimolar somente em casos excepcionais, após a aplicação de fertilizantes (WIREN et al., 1997). A nitrificação autotrófica de  $\text{NH}_4^+$  é retardada pelo baixo pH e pela baixa temperatura, favorecendo a nutrição de  $\text{NH}_4^+$  nos solos ácidos e em clima temperado. As espécies calcífugas, que se adaptam bem às condições ácidas, frequentemente absorvem preferencialmente  $\text{NH}_4^+$  (HAYNES; GOH, 1978). Vários trabalhos realizados sob condições controladas mostraram que as culturas anuais crescem

melhor quando o N é fornecido como mistura de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  (GOOS et al., 1999).

A assimilação de  $\text{NO}_3^-$  necessita de energia igual a 20 moles de ATP (trifosfato de adenosina) por mol de  $\text{NO}_3^-$ , enquanto a assimilação de  $\text{NH}_4^+$  necessita somente de 5 ATP por mol (SALSAC et al., 1987). A economia de energia pode resultar em maior produção de matéria seca pelas plantas que receberam N somente na forma  $\text{NH}_4^+$  (HUFFMAN, 1989). Entretanto, o sistema solo-planta é muito dinâmico e é muito difícil manter somente uma forma de N no solo durante o crescimento das plantas. A absorção de N depende do fornecimento adequado de carboidrato translocado da parte aérea para a raiz. Tanto o N absorvido durante a fase reprodutiva como a remobilização do que foi acumulado durante a fase vegetativa contribuem para a acumulação de N nos grãos (MOLL et al., 1994). A absorção de N em muitas espécies é governada principalmente pela demanda da planta por causa de seu crescimento, desde que exista N suficiente no meio de crescimento e que a absorção pelas raízes não seja inibida por alguns fatores desfavoráveis. Foram propostos muitos modelos em que a demanda de absorção de N pela parte aérea regula a absorção de N pela raiz (BENZIONI et al., 1971). Cooper e Clarkson (1989) propuseram um modelo que integra a absorção de N pelas raízes com sua utilização pela parte aérea, independentemente da forma de N ( $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{NH}_4^+$ ). Nesse modelo, a absorção de N pelas raízes é regulada pela demanda da parte aérea. Sob baixa demanda, a maior fração de N translocada para a parte aérea via xilema é retranslocada para as raízes via floema, o que reduz a taxa de absorção de N. Quando a demanda é alta, a maior fração de N translocada via xilema é utilizada para crescimento da parte aérea, e uma pequena parte é retranslocada para as raízes, o que aumenta a taxa de absorção de N. O N absorvido em excesso para suprimento da parte aérea pode ser retranslocado para as raízes, o que diminui a absorção desse elemento pela planta (ENGELS; MARSCHNER, 1995).

## FUNÇÕES E SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

O N influencia o crescimento da folha e a duração da área foliar e, dessa maneira, o tamanho da fonte de carboidratos e a taxa fotossintética por unidade de área foliar, o que afeta a atividade da fonte, a quantidade e o tamanho dos órgãos vegetativos e reprodutivos de armazenamento e,

por consequência, a capacidade do dreno (ENGELS; MARSCHNER, 1995; FAGERIA et al., 2006a). As plantas deficientes em N terão baixa taxa fotossintética, menor acúmulo de matéria seca e menor produtividade. O N influencia significativamente a produção de matéria seca do feijoeiro (Tabela 1). A massa da matéria seca da parte aérea é positivamente correlacionada com a produtividade de grãos (FAGERIA et al., 2004, 2008). O N aumenta o sistema radicular do feijoeiro, o que pode beneficiar a absorção de água e nutrientes e, consequentemente, a produtividade (Figura 2).

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 2.** Sistema radicular da cultivar Pérola de feijoeiro com 0 e 80 mg de N kg<sup>-1</sup> do solo.

**Tabela 1.** Influência do nitrogênio (N) na massa da matéria seca da parte aérea (MSPA) do feijão em solo de várzea durante o ciclo da cultura.

| Dose de N<br>(kg ha <sup>-1</sup> )                                                                                          | Massa da matéria seca da parte aérea (kg ha <sup>-1</sup> ) |                                |                                |                                |                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
|                                                                                                                              | 23º dia<br>após a<br>semeadura                              | 44º dia<br>após a<br>semeadura | 60º dia<br>após a<br>semeadura | 78º dia<br>após a<br>semeadura | 93º dia após a<br>semeadura |
| 0                                                                                                                            | 80,0                                                        | 118,8                          | 220,0                          | 658,8                          | 1.191,3                     |
| 40                                                                                                                           | 93,1                                                        | 135,6                          | 493,8                          | 971,3                          | 1.442,5                     |
| 80                                                                                                                           | 95,0                                                        | 178,1                          | 813,8                          | 1.796,3                        | 3.340,0                     |
| 120                                                                                                                          | 77,5                                                        | 171,3                          | 827,5                          | 2.576,3                        | 4.503,8                     |
| 160                                                                                                                          | 71,3                                                        | 239,4                          | 1.260,0                        | 2.261,3                        | 5.345,0                     |
| 200                                                                                                                          | 71,3                                                        | 337,5                          | 1.658,8                        | 3.240,0                        | 6.593,8                     |
| Teste F                                                                                                                      | ns                                                          | *                              | **                             | **                             | **                          |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                                  |                                                             |                                |                                |                                |                             |
| Doses de N (X) vs. MSPA aos 23 dias (Y) = 84,5759 + 0,1284 X - 0,0011 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,1598 <sup>ns</sup> |                                                             |                                |                                |                                |                             |
| Dose de N (X) vs. MSPA aos 44 dias (Y) = 117,3500 exp. (0,0023 X) + 0,000011 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,4808**      |                                                             |                                |                                |                                |                             |
| Dose de N (X) vs. MSPA aos 60 dias (Y) = 218,6368 exp. (0,01734 X) - 0,000038 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,8328**     |                                                             |                                |                                |                                |                             |
| Dose de N (X) vs. MSPA aos 78 dias (Y) = 615,2077 exp. (0,0147 X) - 0,000034 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,8399**      |                                                             |                                |                                |                                |                             |
| Dose de N (X) vs. MSPA aos 93 dias (Y) = 1012,8120 exp. (0,0154 X) - 0,000032 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,7135**     |                                                             |                                |                                |                                |                             |

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria e Melo (2014).

As principais formas dos compostos nitrogenados na planta são as proteínas e os ácidos nucleicos. Esses são os principais constituintes do protoplasma, e, portanto, a deficiência de N inibe a divisão celular e, consequentemente, provoca redução no crescimento. A falta de compostos proteicos aumenta a relação C/N, que resulta em excesso de carboidratos e aumento nos conteúdos de celulose e lignina. Com isso, as membranas

celulares engrossam e aumenta a quantidade de tecidos lignificados, o que resulta em maturação precoce (ISHIZUKA, 1978). Quando o teor de um determinado nutriente é baixo no solo, as plantas não podem absorvê-lo em quantidades suficientes para o seu crescimento normal. Assim, aparecem alguns sintomas de deficiência, os quais podem estar relacionados com a redução da altura da planta, da formação de ramos e do crescimento das raízes e com a descoloração (resultante de clorose e necrose) das folhas (FAGERIA et al., 2006a). A mobilidade do nutriente dentro da planta e a posição das folhas que sofrem deficiência estão interligadas. Para nutrientes de alta mobilidade nas plantas, como o N, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas mais velhas (FAGERIA et al., 1996).

O N é o nutriente absorvido em quantidades mais elevadas pelo feijoeiro e, conseqüentemente, a sua deficiência é mais frequente (OLIVEIRA et al., 1996). Além de atrofiamento, os sintomas de deficiência de N são amarelecimento nas folhas mais velhas (que, dependendo da intensidade e da evolução da deficiência, pode atingir toda a planta), morte da lâmina da folha mais baixa (cujo tecido fica com coloração marrom-chocolate) e mudanças na resistência difusiva do  $\text{CO}_2$  em virtude do aumento na resistência do mesófilo e da menor proporção na resistência estomática (RYLE; HESKETH, 1969), o que altera a síntese e atividade da ribulose 1,5 bifosfato carboxilase-oxigenase (rubisco) e provoca redução na taxa fotossintética (COSTA et al., 1988), com conseqüências para o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Nas Figuras 3 e 4, podem ser

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 3.** Plantas das cultivares Pérola e Novo Jalo de feijoeiro sem (A e C) e com nitrogênio (B e D).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 4.** Plantas da cultivar Jalo Precoce de feijoeiro sem (A) e com nitrogênio (B).

observadas plantas de feijão sem e com a aplicação de N. O efeito do N no crescimento da planta é muito claro. As plantas sem aplicação de N mostram a deficiência desse elemento nas folhas pela cor amarela ou laranja.

## TEOR E ACUMULAÇÃO DE NITROGÊNIO

O teor e a acumulação de N são importantes índices na avaliação do estado nutricional da planta. São determinados por meio da análise química quantitativa das plantas ou de parte delas, o que fornece um valor integrado de todos os fatores que influenciam a composição da planta no momento da amostragem. A ideia básica do uso dessa análise é proporcionar a presença do elemento essencial para o crescimento da planta a uma concentração suficiente. Comparando-se a concentração de um dado nutriente na planta com seu nível crítico, previamente estabelecido, pode-se determinar o estado nutricional dessa planta. Plantas



que apresentam concentração acima do nível crítico são consideradas supridas, enquanto as que apresentam concentração abaixo do nível crítico são consideradas deficientes (FAGERIA, 1984; FAGERIA et al., 2008a).

Vários fatores influenciam o estado nutricional da planta, inclusive a sua idade. Portanto, o conhecimento do teor e da acumulação de N durante o ciclo da cultura é importante para o manejo apropriado do N e, ao mesmo tempo, para o aumento da produtividade. O teor de N diminui significativamente de forma quadrática com o avanço da idade das plantas em milho e arroz de terras altas e de forma cúbica em feijão e soja (Figura 5). A variabilidade no teor de N foi de 96% em milho e arroz de terras altas, 87% em soja e 97% em feijão, em função de idade

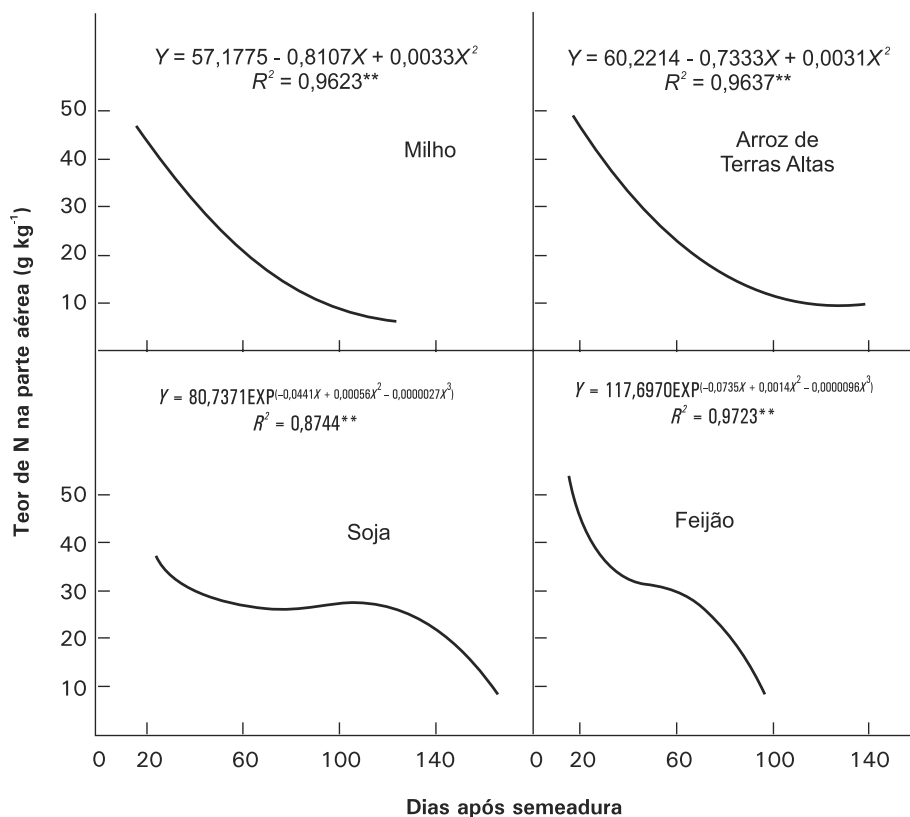


**Figura 5.** Teor de nitrogênio (N) na parte aérea de milho, arroz de terras altas, soja e feijão durante os ciclos das culturas.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Baligar (2005a).

da planta. No milho, aos 18 dias após a semeadura, o teor de N era de  $45 \text{ g kg}^{-1}$  e, na colheita, diminuiu para  $7 \text{ g kg}^{-1}$ . No arroz de terras altas, do início do crescimento até os 19 dias após a semeadura, o teor de N era de  $47 \text{ g kg}^{-1}$  e, na colheita, diminuiu para  $10 \text{ g kg}^{-1}$ . No feijão, aos 15 dias após a semeadura, o teor de N era de  $54 \text{ g kg}^{-1}$  e diminuiu para  $32 \text{ g kg}^{-1}$  com a idade de 50 dias após a semeadura. No período entre 50 e 60 dias, não houve mudança no teor de N, que depois diminuiu linearmente, chegando a  $10 \text{ g kg}^{-1}$  na época da colheita. Na soja, o teor de N no início do crescimento (27 dias após a semeadura) foi de  $36 \text{ g kg}^{-1}$ , diminuiu para  $27 \text{ g kg}^{-1}$  aos 60 dias após a semeadura e ficou estável até 120 dias da semeadura, diminuindo depois linearmente até  $10 \text{ g kg}^{-1}$ . A diminuição no teor de N com o avanço da idade da planta está associada com o aumento da massa de matéria seca da parte aérea e é chamada “efeito de diluição” (FAGERIA; BALIGAR, 2005a; FAGERIA et al., 2006).

A acumulação de N na parte aérea aumentou significativamente e de maneira exponencial nas quatro culturas até certa idade e depois diminuiu (Figura 6). A variabilidade na acumulação de N foi de 96% para milho e soja, 97% para arroz de terras altas e 90% para feijão, com o avanço da idade da planta. Na comparação entre culturas, a acumulação de N na parte aérea foi máxima no milho ( $248 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e mínima no feijão ( $51 \text{ kg ha}^{-1}$ ). No arroz, a acumulação máxima de N foi de  $108 \text{ kg ha}^{-1}$ . Na soja, a acumulação máxima de N foi de  $96 \text{ kg ha}^{-1}$ . A acumulação máxima de N ocorreu aos 62, 100, 120 e 61 dias de idade nas plantas de milho, arroz de terras altas, soja e feijão, respectivamente. A maior acumulação de N em milho está associada com a maior acumulação da massa da matéria seca da parte aérea dessa cultura em comparação à das outras culturas (Figura 7). A máxima acumulação da massa da matéria seca da parte aérea em milho atingiu o valor de  $21.000 \text{ kg ha}^{-1}$  após 61 dias de idade, em arroz de terras altas chegou a  $8.000 \text{ kg ha}^{-1}$  aos 101 dias após a semeadura, em soja atingiu  $5.000 \text{ kg ha}^{-1}$  aos 120 dias de idade e, em feijão, foi de  $3.000 \text{ kg ha}^{-1}$  aos 80 dias após a semeadura. Fageria et al. (2006) relataram que a maior produção de matéria seca da parte aérea de cereais em comparação com a de leguminosas está associada com a menor taxa de fotorrespiração.

A acumulação de N na parte aérea está associada com o aumento da massa da matéria seca da parte aérea do feijoeiro (Tabela 2). Com o avanço da idade da planta, aumenta o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Por exemplo, aos 23 dias de idade, a massa da matéria seca da parte aérea explica 40% da acumulação de N e, na colheita, ela explica 96%.

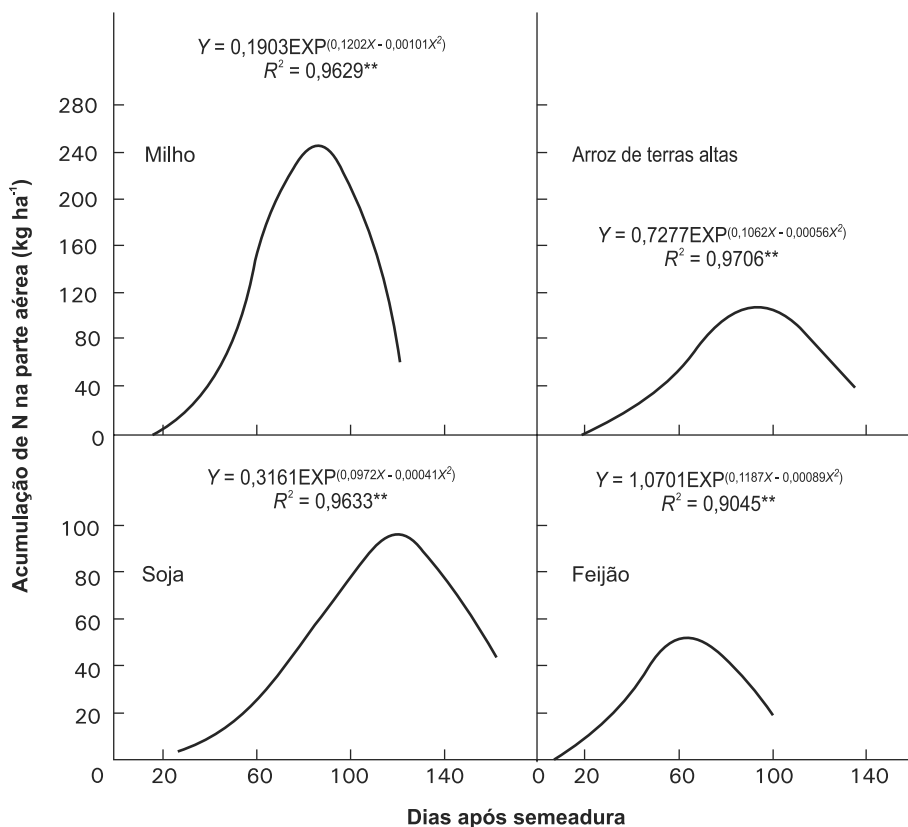


**Figura 6.** Acumulação de nitrogênio (N) na parte aérea de milho, arroz de terras altas, soja e feijão durante os ciclos das culturas.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Baligar (2005).

## EFICIÊNCIA DE USO DO NITROGÊNIO

Na avaliação da produção de biomassa em relação ao fornecimento de nutrientes, a eficiência de uso de N pela planta é considerada tão importante quanto a eficiência de absorção (FAGERIA; BALIGAR, 2005a). Uma planta pode ser eficiente na absorção de N, porém não no seu uso. O aumento da eficiência de uso de N só será factível mediante a redução das perdas do N e a melhoria da sua absorção pelas plantas. A eficiência de absorção e a eficiência de uso são governadas por diferentes mecanismos fisiológicos. Os associados com a eficiência de uso do N incluem: 1) proliferação das raízes; 2) eficiência de absorção; 3) eficiência

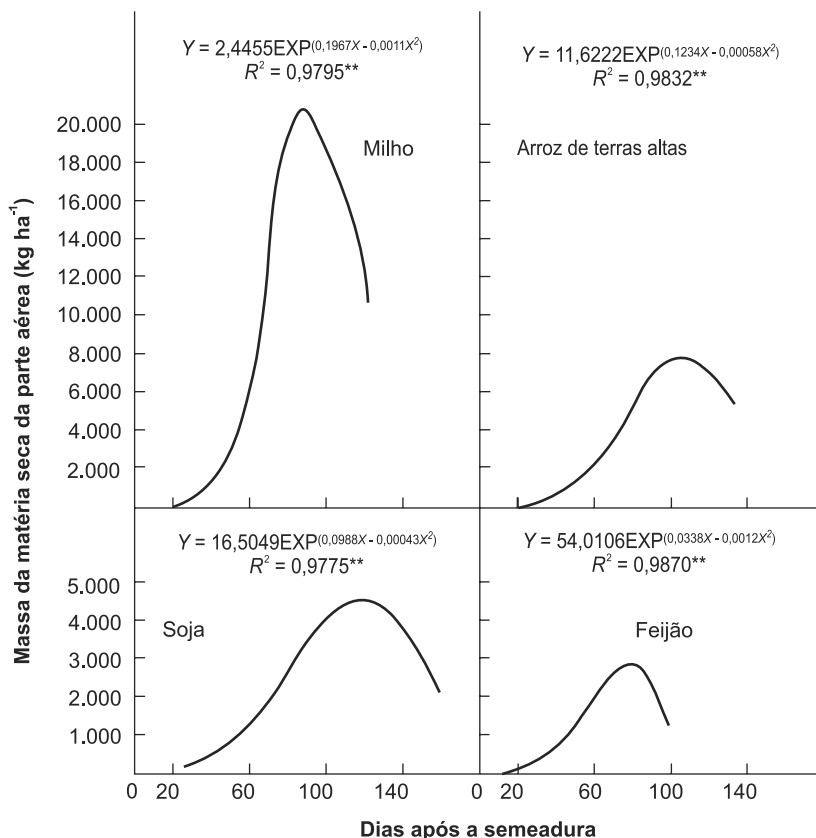


**Figura 7.** Massa da matéria seca da parte aérea de milho, arroz de terras altas, soja e feijão durante os ciclos das culturas.

Fonte: adaptado de Fageria e Baligar (2005).

da enzima de redução do N; e 4) tolerância ao  $\text{NH}_4^+$  (FAGERIA; BALIGAR, 2005a). Cada fase da assimilação do N está sob controle genético.

A técnica de empregar o isótopo  $^{15}\text{N}$  é extensivamente usada para medir a absorção e identificar perdas de N. A eficiência de uso do N pelas plantas é definida de cinco diferentes maneiras na literatura (FAGERIA, 1992; FAGERIA; BALIGAR, 2005) calculadas para as culturas anuais usando as seguintes fórmulas (FAGERIA; BALIGAR, 2005a; FAGERIA et al., 2013):

$$\text{Eficiência agrônômica (EA)} = (PG_{cf} - PG_{sj}) / (QN_a), \text{ dada em kg kg}^{-1}$$

**Tabela 2.** Relação entre acumulação de nitrogênio na parte aérea ( $X$ ) e massa da matéria seca da parte aérea ( $Y$ ) do feijoeiro durante o ciclo da cultura.

| Dia após a<br>semeadura | Equação de regressão                     | $R^{2(1)}$ |
|-------------------------|------------------------------------------|------------|
| 23                      | $Y = 72,0821 - 6,0981 X + 2,6565 X^2$    | 0,3982**   |
| 44                      | $Y = 20,9390 + 26,8813 X - 0,1793 X^2$   | 0,9541**   |
| 60                      | $Y = 104,7333 + 31,2509 X - 0,0831 X^2$  | 0,9747**   |
| 78                      | $Y = -57,4375 + 58,4019 X - 0,2514 X^2$  | 0,8952**   |
| 93                      | $Y = -140,0456 + 66,0177 X - 0,1014 X^2$ | 0,9607**   |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

em que  $PG_{cf}$  = produção de grãos com fertilizante nitrogenado,  $PG_{sf}$  = produção de grãos sem fertilizante nitrogenado e  $QN_a$  = quantidade de N aplicado.

$$\text{Eficiência fisiológica (EF)} = (PB_{cf} - PB_{sf}) / (AN_{cf} - AN_{sf}), \text{ dada em kg kg}^{-1}$$

em que  $PB_{cf}$  = produção biológica (palha e grãos) com fertilizante N,  $PB_{sf}$  = produção biológica (palha e grãos) sem fertilizante N,  $AN_{cf}$  = acumulação de N na parte aérea e grãos com fertilizante N e  $AN_{sf}$  = acumulação de N na parte aérea e grãos sem fertilizante N.

$$\text{Eficiência agrofisiológica (EAF)} = (PG_{cf} - PG_{sf}) / AN_{cf} - AN_{sf}, \text{ dada em kg kg}^{-1}$$

em que  $PG_{cf}$  = produção de grãos com fertilizante nitrogenado,  $PG_{sf}$  = produção de grãos sem fertilizante nitrogenado,  $AN_{cf}$  = acumulação de N na parte aérea e grãos com fertilizante N e  $AN_{sf}$  = acumulação de N na parte aérea e grãos sem fertilizante N.

$$\text{Eficiência de recuperação (ER)} = (AN_{cf} - AN_{sf}) / QN_a \times 100, \text{ dada em \%}$$

em que  $AN_{cf}$  = acumulação de N na parte aérea e grãos com fertilizante N e  $AN_{sf}$  = acumulação de N na parte aérea e grãos sem fertilizante N,  $QN_a$  = quantidade de N aplicado.

$$\text{Eficiência de utilização (EU)} = EF \times ER, \text{ dada em kg kg}^{-1}$$

Os resultados de três desses cálculos sob doses de N determinadas em condições de campo são apresentados na Tabela 3. A eficiência

**Tabela 3.** Influência de doses de nitrogênio (N) na eficiência de uso no feijoeiro em solo de várzea.

| Dose de N<br>(kg ha <sup>-1</sup> )                                                                                                      | Local 1 <sup>(1)</sup>       |                              |                               | Local 2 <sup>(1)</sup>       |                              |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|                                                                                                                                          | EA<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | EF<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | EAF<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | EA<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | EF<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | EAF<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) |
| 40                                                                                                                                       | 17,0                         | 49,0                         | 34,4                          | 19,8                         | 72,9                         | 30,2                          |
| 80                                                                                                                                       | 12,7                         | 60,3                         | 38,5                          | 16,7                         | 94,2                         | 20,5                          |
| 120                                                                                                                                      | 10,0                         | 50,0                         | 32,8                          | 13,9                         | 81,3                         | 22,0                          |
| 160                                                                                                                                      | 9,1                          | 36,6                         | 30,8                          | 11,8                         | 77,2                         | 19,7                          |
| Média                                                                                                                                    | 9,7                          | 48,9                         | 34,1                          | 15,6                         | 81,4                         | 23,1                          |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                                              |                              |                              |                               |                              |                              |                               |
| Dose de N (X) vs. Valor médio de EA dos dois locais (Y) = 23,27 - 0,1352 X + 0,00034 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,99*             |                              |                              |                               |                              |                              |                               |
| Dose de N (X) vs. Valor médio de EF dos dois locais (Y) = 39,81 + 0,7234 X - 0,8925 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,80 <sup>ns</sup> |                              |                              |                               |                              |                              |                               |
| Dose de N (X) vs. Valor médio de EAF dos dois locais (Y) = 34,92 - 0,0656 X, R <sup>2</sup> = 0,99*                                      |                              |                              |                               |                              |                              |                               |

<sup>(1)</sup>EA = Eficiência agrônômica; EF = Eficiência fisiológica; EAF = Eficiência agrofisiológica.

\*Significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria et al. (2013).

agronômica e a agrofisiológica foram influenciadas (diminuíram) significativamente pelo aumento das doses de N. Em média, a eficiência agrônômica foi de 13 kg de grãos produzidos por kg de N aplicado, a eficiência fisiológica foi de 65 kg de matéria seca biológica (parte aérea + grãos) por unidade de N acumulado, e a eficiência agrofisiológica foi de 29 kg de grãos produzidos por kg de N acumulado. A alta eficiência com baixo nível de N pode estar relacionada com o efeito de diluição do N pela pequena quantidade de matéria seca produzida (FAGERIA et al., 2013). Todas as eficiências também foram calculadas com os dados de um ensaio em casa de vegetação utilizando 20 genótipos de feijão em solo de Cerrado (Tabela 4). As eficiências variaram de genótipo para genótipo. A eficiência de utilização variou de 7,3 kg kg<sup>-1</sup> a 21,2 kg kg<sup>-1</sup>, uma variabilidade de quase três vezes entre os genótipos BRS Valente

**Tabela 4.** Eficiência de uso de nitrogênio (N) por genótipos de feijoeiro<sup>(1)</sup>.

| Genótipo       | Eficiência de uso de N <sup>(2)</sup> |                              |                               |           |                              |
|----------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|------------------------------|
|                | EA<br>(kg kg <sup>-1</sup> )          | EF<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | EAF<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | ER<br>(%) | EU<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) |
| Pérola         | 5,9                                   | 22,0efg                      | 13,3ab                        | 47,5      | 10,1                         |
| BRS Valente    | 3,7                                   | 26,5cdefg                    | 12,7ab                        | 27,0      | 7,3                          |
| CNFM 6911      | 4,7                                   | 28,7bcdef                    | 13,9ab                        | 30,3      | 8,7                          |
| CNFR 7552      | 8,4                                   | 48,3a                        | 21,9ab                        | 38,7      | 18,7                         |
| BRS Radiante   | 9,0                                   | 33,9abcdef                   | 18,1ab                        | 53,6      | 17,9                         |
| Jalo Precoce   | 6,3                                   | 30,7bcdef                    | 14,8ab                        | 40,9      | 13,1                         |
| Diamante Negro | 7,1                                   | 24,7defg                     | 12,6ab                        | 48,1      | 13,1                         |
| CNFP 7624      | 1,5                                   | 42,0ab                       | 22,8ab                        | 50,4      | 21,2                         |
| CNFR 7847      | 9,0                                   | 27,8bcdefg                   | 16,4ab                        | 43,3      | 12,4                         |
| CNFR 7866      | 6,1                                   | 13,0g                        | 10,2b                         | 60,5      | 8,2                          |
| CNFR 7865      | 6,2                                   | 27,6bcdefg                   | 12,5ab                        | 47,6      | 12,4                         |
| CNFM 7875      | 11,2                                  | 36,0abcde                    | 21,5ab                        | 52,3      | 18,8                         |
| CNFM 7886      | 10,6                                  | 35,7abcde                    | 19,3ab                        | 54,7      | 19,5                         |
| CNFC 7813      | 10,7                                  | 35,0abcde                    | 20,6ab                        | 51,6      | 18,1                         |
| CNFC 7827      | 11,8                                  | 40,1abc                      | 24,4a                         | 49,0      | 19,5                         |
| CNFC 7806      | 8,1                                   | 26,9bcdefg                   | 15,3ab                        | 48,7      | 14,0                         |
| CNFP 7677      | 10,7                                  | 35,6abcde                    | 21,2ab                        | 50,5      | 18,0                         |
| CNFP 7775      | 10,7                                  | 39,9abcd                     | 23,2ab                        | 46,2      | 18,3                         |
| CNFP 7777      | 8,1                                   | 30,8bcdef                    | 15,7ab                        | 51,4      | 15,9                         |
| CNFP 7792      | 3,9                                   | 19,2fg                       | 10,5ab                        | 37,2      | 7,4                          |
| Média          | 8,2                                   | 31,2                         | 17,0                          | 46,5      | 14,6                         |
| Teste F        | **                                    | **                           | **                            | ns        | **                           |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>(2)</sup> EA = Eficiência agronômica; EF = Eficiência fisiológica; EAF = Eficiência agrofisiológica; ER = Eficiência de recuperação; EU = Eficiência de utilização.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria et al. (2013).

e CNFP 7624. Na média, a eficiência de recuperação foi de 47%. Isso significa que grande parte do N é perdida no sistema solo-planta.

Todas as eficiências descritas anteriormente são menores para o feijão do que para o arroz (FAGERIA et al., 2006a). É relatado na literatura que a eficiência de N é maior nos cereais do que nas leguminosas (FAGERIA; SANTOS, 2008; NAKAMURA et al., 1997). Isso está relacionado com a baixa eficiência de crescimento da parte aérea, mas não com a nodulação e com a baixa eficiência de produção de grãos (SHINANO et al., 1995). Shinano et al. (1994) sugeriram que, quando  $^{14}\text{CO}_2$  foi aplicado nas folhas de arroz e de soja, a quantidade de  $^{14}\text{CO}_2$  liberado das folhas de soja foi maior do que a das folhas de arroz graças aos altos índices de fotorrespiração da soja. Além disso, o C fotossintetizado nas folhas da soja foi mais distribuído em ácidos orgânicos e aminoácidos do que no arroz. Portanto, foi formulada uma hipótese de que o mecanismo de distribuição do C parece ser diferente entre cereais e leguminosas: 1) nas leguminosas, o C fotossintetizado é distribuído ativamente na reserva de TCA (ácidos tricarboxílicos)/aminoácidos, o que resulta em alta taxa de respiração. Já em cereais, uma alta proporção do C fotossintetizado é distribuída na reserva de carboidratos; e 2) a atividade de fotorrespiração é maior nas leguminosas do que nos cereais (NAKAMURA et al., 1997). Por outro lado, a translocação de N nos grãos é maior nas leguminosas em comparação aos cereais. Um resumo dos fatores fisiológicos e morfológicos que estão associados com o uso do N é discutido por Duncan (1994).

## ÍNDICE DE COLHEITA DE NITROGÊNIO

O índice de colheita de N (ICN = N acumulado nos grãos/N acumulado nos grãos e na parte aérea) é uma medida da distribuição de N na planta, que fornece a indicação do uso eficiente do N na produção de grãos. Existe variabilidade genética entre as culturas anuais com relação ao ICN (HALLORAN, 1981). Altos índices de ICN estão associados com a utilização eficiente do N (FAWCETT; FREY, 1983) e com altos teores de proteínas nos grãos (WELCH; YONG, 1980). Na seleção para alto ICN, pode ocorrer simultaneamente melhoramento para alta produtividade e alto teor de proteína nos grãos. Na Tabela 5, estão apresentados os valores de ICN para 20 genótipos de feijão sob duas doses de N.



**Tabela 5.** Índice de colheita de nitrogênio (N) em 20 genótipos de feijoeiro.

| <b>Genótipo</b> | <b>Sem aplicação de N no solo</b> | <b>Com aplicação de N (400 mg kg<sup>-1</sup> do solo)<sup>(1)</sup></b> |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Pérola          | 0,82                              | 0,73ab                                                                   |
| BRS Valente     | 0,44                              | 0,53b                                                                    |
| CNFM 6911       | 0,80                              | 0,79ab                                                                   |
| CNFR 7552       | 0,57                              | 0,68ab                                                                   |
| BRS Radiante    | 0,67                              | 0,69ab                                                                   |
| Jalo Precoce    | 0,67                              | 0,75ab                                                                   |
| Diamante Negro  | 0,65                              | 0,71ab                                                                   |
| CNFP 7624       | 0,43                              | 0,78ab                                                                   |
| CNFR 7847       | 0,80                              | 0,85a                                                                    |
| CNFR 7866       | 0,47                              | 0,74ab                                                                   |
| CNFR 7865       | 0,71                              | 0,69ab                                                                   |
| CNFM 7875       | 0,45                              | 0,85a                                                                    |
| CNFM 7886       | 0,44                              | 0,78ab                                                                   |
| CNFC 7813       | 0,47                              | 0,85a                                                                    |
| CNFC 7827       | 0,71                              | 0,85a                                                                    |
| CNFC 7806       | 0,69                              | 0,78ab                                                                   |
| CNFP 7677       | 0,71                              | 0,85a                                                                    |
| CNFP 7775       | 0,70                              | 0,85a                                                                    |
| CNFP 7777       | 0,79                              | 0,88ab                                                                   |
| CNFP 7792       | 0,62                              | 0,72ab                                                                   |
| Média           | 0,63                              | 0,75                                                                     |
| <b>Teste F</b>  |                                   |                                                                          |
| Dose de N (N)   |                                   | **                                                                       |
| Genótipo (G)    |                                   | **                                                                       |
| N versus G      |                                   | **                                                                       |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2013).

O ICN variou de 0,43 para o genótipo CNFP 7624 a 0,82 para a cultivar Pérola, com média de 0,63 para os 20 genótipos não submetidos à aplicação de N. A diferença entre o menor e o maior ICN foi de quase o dobro. Da mesma maneira, após aplicação de alta dose de N, o ICN variou de 0,53 para a cultivar BRS Valente a 0,88 para o genótipo CNFP 7777. O valor médio para os 20 genótipos foi de 0,75. Na média, a diferença do ICN entre as duas colunas da tabela (ausência de aplicação de N e alta dose de N) foi de 19%. Desde que o ICN passou a ser positivamente relacionado com a produtividade de grãos (FAGERIA; SANTOS, 2008), o alto valor de ICN tornou-se importante índice para avaliar o aumento da produtividade (FAGERIA; BALIGAR, 2005a).

## INTERAÇÃO ENTRE NITROGÊNIO E OUTROS NUTRIENTES

O conhecimento da interação entre nutrientes essenciais na planta é importante para determinar a quantidade que a planta deve receber de cada um, de forma balanceada, para obter a máxima produtividade. A interação entre nutrientes pode ser de caráter antagônico, sinérgico ou neutro. Pode ser avaliada pela medição da produtividade e seus componentes ou pela acumulação nas plantas. Quando a produtividade da planta é menor com a aplicação de doses de dois nutrientes em comparação com a dose individual de um dado nutriente, isso significa que a interação tem caráter antagônico. Porém, quando a produtividade é maior quando dois nutrientes são aplicados, a interação é sinérgica. Quando não houver efeito significativo com a aplicação simultânea de dois nutrientes, isso significa que não há interação. O mesmo critério se aplica para a absorção ou acumulação de nutrientes na planta. Fageria (2014) conduziram estudo em solo de várzea para determinar a interação entre N e macro e micronutrientes (Tabelas 6 e 7). A acumulação de macro e micronutrientes na parte aérea do feijoeiro aumentou significativamente de forma linear com o aumento das doses de N na faixa de 0 a 200 kg ha<sup>-1</sup>. Entre os macronutrientes, a variabilidade na acumulação combinada com o aumento de doses de N no solo ocorreu na seguinte ordem: P > Mg > K = Ca<sup>1</sup>. Isso significa que o N influenciou mais a absorção de P e menos as de Ca e K. No caso dos micronutrientes, a influência do N foi na seguinte ordem: Cu > Zn > Fe > Mn<sup>2</sup>.

**Tabela 6.** Influência de nitrogênio (N) na acumulação de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro.

| Dose de N<br>(kg ha <sup>-1</sup> )                                                   | Fósforo (P)<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Potássio (K)<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Cálcio (Ca)<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Magnésio (Mg)<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| 0                                                                                     | 0,6                                   | 4,4                                    | 4,1                                   | 1,0                                     |
| 40                                                                                    | 1,4                                   | 9,4                                    | 8,2                                   | 2,1                                     |
| 80                                                                                    | 1,6                                   | 17,2                                   | 12,8                                  | 3,2                                     |
| 120                                                                                   | 2,1                                   | 16,7                                   | 12,9                                  | 3,3                                     |
| 160                                                                                   | 2,9                                   | 28,6                                   | 18,4                                  | 5,1                                     |
| 200                                                                                   | 3,4                                   | 33,2                                   | 24,9                                  | 6,5                                     |
| Teste F                                                                               | **                                    | **                                     | **                                    | **                                      |
| <b>Análise de regressão</b>                                                           |                                       |                                        |                                       |                                         |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de P (Y) = 0,6428 + 0,0136 X, R <sup>2</sup> = 0,9801**  |                                       |                                        |                                       |                                         |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de K (Y) = 3,8857 + 0,1436 X, R <sup>2</sup> = 0,9564**  |                                       |                                        |                                       |                                         |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de Ca (Y) = 3,9285 + 0,0962 X, R <sup>2</sup> = 0,9564** |                                       |                                        |                                       |                                         |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de Mg (Y) = 0,9190 + 0,0261 X, R <sup>2</sup> = 0,9623** |                                       |                                        |                                       |                                         |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2014).

## ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO

A eficiência de recuperação do N pelo feijoeiro é menor do que 50% tanto em solo de várzea como de Cerrado (FAGERIA et al., 2006a). Nessa situação, o uso racional da adubação nitrogenada é fundamental, não somente para aumentar a eficiência de recuperação, mas também para aumentar a produtividade de grãos e para diminuir o custo de produção e os riscos de poluição ambiental. Uma das maneiras de aumentar a eficiência de recuperação de N consiste no uso de práticas de manejo, tais como escolha de dose, época e fontes de aplicação mais apropriadas de acordo com a necessidade da cultura. Além disso, a escolha de genótipos mais eficientes no uso e absorção de N e o controle de pragas, doenças e plantas daninhas são práticas que determinam a eficiência de uso do N.

**Tabela 7.** Influência do nitrogênio (N) na acumulação de micronutrientes na parte aérea do feijoeiro.

| Dose de N<br>(kg ha <sup>-1</sup> )                                                    | Zinco (Zn)<br>(g ha <sup>-1</sup> ) | Cobre (Cu)<br>(g ha <sup>-1</sup> ) | Manganês (Mn)<br>(g ha <sup>-1</sup> ) | Ferro (Fe)<br>(g ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| 0                                                                                      | 14,0                                | 3,0                                 | 43,3                                   | 57,9                                |
| 40                                                                                     | 27,7                                | 5,2                                 | 115,9                                  | 142,8                               |
| 80                                                                                     | 38,4                                | 8,9                                 | 156,9                                  | 225,4                               |
| 120                                                                                    | 42,1                                | 9,6                                 | 153,3                                  | 219,0                               |
| 160                                                                                    | 62,0                                | 15,0                                | 222,1                                  | 365,1                               |
| 200                                                                                    | 88,5                                | 18,7                                | 361,8                                  | 519,1                               |
| Teste F                                                                                | **                                  | **                                  | **                                     | **                                  |
| <b>Análise de regressão</b>                                                            |                                     |                                     |                                        |                                     |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de Zn (Y) = 11,2285 + 0,3422 X, R <sup>2</sup> = 0,9389** |                                     |                                     |                                        |                                     |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de Cu (Y) = 2,3095 + 0,0775 X, R <sup>2</sup> = 0,9682**  |                                     |                                     |                                        |                                     |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de Mn (Y) = 39,3001 + 1,3625 X, R <sup>2</sup> = 0,8855** |                                     |                                     |                                        |                                     |
| Dose de N (X) vs. Acumulação de Fe (Y) = 42,9905 + 2,1189 X, R <sup>2</sup> = 0,9273** |                                     |                                     |                                        |                                     |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2014).

## Dose de nitrogênio

A quantidade de N necessária para se obter alta produtividade do feijoeiro é determinada por teor de matéria orgânica no solo, textura e pH do solo, sistema de cultivo, cultivar, disponibilidade de água e controle de doenças, pragas e plantas daninhas. Ainda não existe um método de análise de N que inclua todas as características desejadas para a análise de rotina do solo. Por isso, não é possível preparar uma curva de calibração para esse nutriente. O problema é que a maior parte do N do solo está sob formas orgânicas, que devem ser mineralizadas para liberá-lo e torná-lo aproveitável pelas plantas. A mineralização é um processo biológico influenciado por vários fatores, como a forma orgânica em que o N se encontra, as características químicas do solo e as condições do meio ambiente do solo. Daí decorrem todos os problemas que o pesquisador

enfrenta quando tenta criar um método de análise do solo para o N que será liberado da matéria orgânica durante o ciclo da cultura.

O N é um elemento que se perde facilmente por lixiviação, volatilização e desnitrificação no solo. Assim, seu manejo adequado é um dos mais difíceis, e a única alternativa para fazer recomendação de adubação nitrogenada é a determinação da curva de resposta em relação a várias doses desse nutriente. Silva e Silveira (2000) estudaram a resposta do feijoeiro à aplicação de N em solo de Cerrado e em sistemas de rotação e preparo do solo (Tabela 8). O N foi aplicado em cobertura aproximadamente uma semana antes da floração. Na época da semeadura, foram aplicados (na forma de 4-30-16) 400 kg de adubo ha<sup>-1</sup>. A resposta da cultura foi significativa e quadrática com a aplicação de N na faixa de 0 a 125 kg ha<sup>-1</sup>. A partir da equação de regressão, a produtividade máxima foi obtida com a aplicação de 106 kg de N ha<sup>-1</sup>. Fageria e Stone (2004) estudaram a resposta do feijoeiro à aplicação de Zn e calagem em solo de Cerrado por 3 anos. No segundo ano de plantio, foi adotado o sistema de plantio direto. Nesse ensaio, foi obtida produtividade de grãos de aproximadamente 3.000 kg ha<sup>-1</sup> com a aplicação de 120 kg de N ha<sup>-1</sup>, sendo 20 kg de N ha<sup>-1</sup> aplicados na semeadura e 50 kg de N ha<sup>-1</sup> aplicados

**Tabela 8.** Resposta do feijoeiro à aplicação de nitrogênio (N) em cobertura. Os valores são as médias de 2 anos e quatro sistemas de rotação.

| Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> )                                                                                         | Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0                                                                                                                        | 1.348                                         |
| 25                                                                                                                       | 1.841                                         |
| 50                                                                                                                       | 2.049                                         |
| 75                                                                                                                       | 2.191                                         |
| 100                                                                                                                      | 2.184                                         |
| 125                                                                                                                      | 2.303                                         |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                              |                                               |
| Dose de N (X) vs. Produtividade de grãos (Y) = 1398,7850 + 16,5454 X - 0,0780 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,9675** |                                               |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Silva e Silveira (2000).

em cobertura aos 27 e 41 dias após a semeadura. Barbosa Filho e Silva (2000) relataram que o feijoeiro responde à adubação nitrogenada em cobertura, atingindo produtividade de grãos máxima de  $3.170 \text{ kg ha}^{-1}$  com a aplicação de  $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$  em cobertura 25 dias após a emergência das plantas. Nesse ensaio, foram aplicados (na forma de 4-30-16)  $400 \text{ kg de adubo básico ha}^{-1}$ . Pelegrin et al. (2009) relataram que houve resposta quadrática<sup>1</sup> ao N e que a produtividade máxima foi alcançada com a dose de  $119 \text{ kg de N ha}^{-1}$  em solo de Cerrado do Mato Grosso. Soratto et al. (2006), em ensaio realizado na região leste de Mato Grosso do Sul, também encontraram resposta quadrática para a produtividade de grãos, com a dose estimada para a máxima produtividade sendo superior a  $140 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Farinelli et al. (2006) avaliaram a aplicação de doses de N em cobertura na cultura do feijoeiro, manejado em plantio direto e plantio convencional, e também verificaram ajuste quadrático para a produtividade no primeiro ano, sendo a produtividade mais elevada alcançada com a aplicação de  $78 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . No segundo ano, obtiveram resposta linear no sistema de plantio direto e quadrática no sistema convencional, sendo a produtividade máxima alcançada com a aplicação de  $185 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Em outro ensaio realizado em Mato Grosso do Sul, a produtividade máxima de grãos do feijoeiro foi alcançada com aplicação de  $140 \text{ kg de N ha}^{-1}$ , para três das quatro cultivares avaliadas (MERCANTE et al., 2006).

Crusciol et al. (2007) relataram que a produtividade do feijoeiro aumentou linearmente com a cobertura de N na faixa de 0 a  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  na forma de ureia em um Nitossolo Vermelho no sistema de plantio direto. A aplicação de N em cobertura foi realizada 22 dias após a emergência das plantas. Nesse ensaio, foram aplicados  $20 \text{ kg de N ha}^{-1}$  por ocasião da semeadura, e a produtividade alcançada situou-se em torno de  $3.000 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Soratto et al. (2004) relataram resposta significativa e quadrática do feijoeiro à aplicação de N na faixa de 0 a  $210 \text{ kg ha}^{-1}$  em plantio direto e no sistema de plantio convencional em um Latossolo Vermelho distrófico (Oxissolo). No plantio direto, a equação que relacionou a dose de N à produtividade foi  $Y = 1.112,20 + 13,163 X - 0,0362 X^2$ ,  $R^2 = 0,99^{**}$ , e, no sistema convencional, foi  $Y = 1.211,20 + 9,862 X - 0,0383 X^2$ ,  $R^2$

<sup>1</sup> ( $Y = 3025,19 + 13,75 X - 0,058 X^2$ ,  $R^2 = 0,88^{**}$ ), onde Y = produtividade de grãos, X = dose de N,  $R^2$  = coeficiente de determinação e  $^{**}$  = significativo a 1% de probabilidade.

= 0,96<sup>\*\*</sup>. Com base na equação de regressão, a produtividade máxima (2.250 kg ha<sup>-1</sup>) no sistema de plantio direto foi obtida com a aplicação de 182 kg de N ha<sup>-1</sup> em cobertura aos 20 dias após a emergência das plântulas. No sistema convencional, a produtividade máxima (cerca de 1.700 kg ha<sup>-1</sup>) foi obtida com a aplicação de 129 kg de N ha<sup>-1</sup> em cobertura. A magnitude da resposta foi maior em plantio direto em comparação ao sistema de plantio convencional. Nesse ensaio, por ocasião da semeadura, aplicaram-se 240 kg de adubo ha<sup>-1</sup> (na forma de 8-28-16 de NPK). Meira et al. (2005) relataram que a máxima produtividade (3.600 kg ha<sup>-1</sup>) foi obtida com a aplicação de 164 kg de N ha<sup>-1</sup> em cobertura aos 38 dias após a emergência das plântulas no sistema de plantio direto. De acordo com esses autores, tal dose se justifica pela presença de material vegetal sobre o solo, deixado pela cultura anterior, e pelo início do sistema de plantio direto.

A maioria das recomendações de adubação nitrogenada é direcionada ao sistema de preparo convencional (SORATTO et al., 2004). Carvalho et al. (1992) recomendam 90 kg de N ha<sup>-1</sup> para alcançar a produtividade máxima. Já Silveira e Damasceno (1993), em sistema de preparo convencional, obtiveram resposta quadrática do feijoeiro ao N, e a produtividade máxima foi alcançada com 74 kg de N ha<sup>-1</sup>. Por outro lado, também em solo do Cerrado, sob sistema de plantio direto, Soratto et al. (2001) e Silva et al. (2003) verificaram respostas lineares da produtividade até as doses máximas testadas, ou seja, 100 kg ha<sup>-1</sup> e 150 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Em plantio direto, em razão da minimização do estresse hídrico proporcionado por esse sistema (ANDRADE et al., 2002; STONE; SILVEIRA, 1999), o feijoeiro pode apresentar melhor eficiência de utilização do N aplicado em cobertura (COSTA et al., 1988).

O cultivo do feijoeiro irrigado por subirrigação, na entressafra do arroz, tem-se mostrado uma alternativa viável para aumentar a produtividade de grãos no ecossistema de várzea (SANTOS; SILVEIRA, 1996). Santos et al. (2003) avaliaram a resposta do feijoeiro à aplicação de N em solo de várzea na faixa de 0 a 160 kg de N ha<sup>-1</sup> ( $Y = 883,86 + 21,33314 X - 0,06086 X^2$ ,  $R^2 = 0,9990^{**}$ ). Com base nessa equação, a produtividade máxima de 3.000 kg ha<sup>-1</sup> foi obtida com a aplicação de 175 kg de N ha<sup>-1</sup> aos 20 dias após a emergência das plântulas. Porém, a dose necessária para a máxima eficiência técnica, ou seja, aquela que proporcionou 90% do valor máximo da produtividade, foi 108 kg de

N ha<sup>-1</sup> incorporado ao solo aos 20 dias após a emergência das plântulas. Com base nos dados de pesquisa discutidos anteriormente e na experiência dos autores, pode-se concluir que, para a cultura do feijoeiro, são necessários de 120 kg de N ha<sup>-1</sup> a 140 kg de N ha<sup>-1</sup> para se obter produtividades em torno de 3.000 kg ha<sup>-1</sup>. Em plantio convencional, a necessidade de N é menor do que em plantio direto.

## Época de aplicação

A época de aplicação do N é importante tanto para aumentar a sua eficiência na utilização pelas plantas como para aumentar a produtividade. A melhor época são os períodos do ciclo em que o suprimento ou a disponibilidade de nutrientes é fundamental para garantir o crescimento e desenvolvimento das plantas. Os nutrientes imóveis no sistema solo-planta, como P e K, devem ser aplicados no sulco de semeadura mais perto do sistema radicular para facilitar sua absorção. Os nutrientes móveis, como o N, podem ser aplicados tanto no sulco de semeadura como em cobertura durante o crescimento da cultura. A maioria dos trabalhos sobre o uso de N no feijoeiro mostra que a maior parte do N é aplicada em cobertura na faixa de 20 a 40 dias após a emergência das plântulas (CARVALHO et al., 2003; MEIRA et al., 2005; MIYASAKA et al., 1963; ROSOLEM, 1987; SANTOS et al., 2003; SORATTO et al., 2004). Porém, em trabalho realizado por Santos e Fageria (2008) em solos de várzea, constatou-se que os métodos 1 (incorporação de todo o N na semeadura) e 2 (aplicação de parte do N na semeadura e parte aos 20 dias após a emergência das plântulas) demandaram menores doses do fertilizante para obtenção dos maiores índices fisiológicos do feijoeiro do que o método 3 (aplicação de parte do N a lanco na superfície do solo). Kluthcouski et al. (2006) avaliaram o impacto de três fontes e três épocas de aplicação do N na produtividade do feijoeiro (Tabela 9). A produção máxima foi obtida com a aplicação de ureia aos 10 dias após a emergência das plântulas, resultando em 12% a mais em comparação com a produção obtida com a aplicação total na semeadura. A aplicação de N na forma de sulfato de amônio na época de semeadura produziu, respectivamente, 31,6% e 26,3% a mais em comparação com a aplicação aos 10 e 20 dias após a emergência das plântulas. Com base na experiência dos autores, pode-se concluir que grande parte da dose de N (de 50% a 60%) deve ser aplicada na época de semeadura e o restante em cobertura, especialmente no caso



do sistema de plantio direto e em várzeas tropicais. A data apropriada de cobertura é entre 20 e 40 dias após a emergência das plântulas, dependendo do solo e do sistema de plantio.

**Tabela 9.** Fontes e épocas de aplicação de nitrogênio (N) e sua influência na produtividade do feijoeiro em solo de várzea. O total de N aplicado foi de 90 kg ha<sup>-1</sup>.

| Fonte e época de aplicação de N             | Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Testemunha (sem N)                          | 1.672cd                                                      |
| Ureia base                                  | 2.165ab                                                      |
| Sulfato de amônio base                      | 1.987abc                                                     |
| Ureia (aos 10 DAE <sup>(2)</sup> )          | 2.433a                                                       |
| Sulfato de amônio (aos 10 DAE)              | 1.510d                                                       |
| Ureia (aos 20 DAE)                          | 1.687cd                                                      |
| Sulfato de amônio (aos 20 DAE)              | 1.573cd                                                      |
| Inoculação de sementes com <i>Rhizobium</i> | 1.752bcd                                                     |
| CV% <sup>(3)</sup>                          | 10,8                                                         |

<sup>(1)</sup>Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

<sup>(2)</sup>Dias após a emergência do feijoeiro.

<sup>(3)</sup>Coeficiente de variação.

Fonte: adaptada de Kluthcouski et al. (2006).

## Fonte de nitrogênio

Existem várias fontes de N no mercado, mas seu uso depende do teor de N, o qual determina o custo de transporte. Além disso, devem ser levados em consideração os efeitos da aplicação nas propriedades químicas dos solos, como mudança no pH e teor de outros nutrientes essenciais, e a facilidade na aplicação. Os principais fertilizantes nitrogenados, sua fórmula química e seu teor de N são apresentados na Tabela 10.

No Brasil, as principais fontes de N utilizadas na cultura do feijoeiro são a ureia e o sulfato de amônio. Tanto um como outro são igualmente efetivos, porém, o custo de aplicação da ureia é menor, pois a ureia contém 45% de N (mais do que os 21% de N do sulfato). Entretanto, como

o sulfato de amônio contém cerca de 24% de enxofre (S), em caso de deficiência também desse nutriente, deve-se optar por aplicar parte do N na forma de sulfato de amônio.

**Tabela 10.** Principais fertilizantes nitrogenados e algumas de suas propriedades.

| Fertilizante                                               | Teor de N (%) | Solubilidade em água (%) |
|------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|
| Sulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$           | 21            | 100                      |
| Ureia $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$                         | 45            | 100                      |
| Nitrato de amônio $(\text{NH}_4\text{NO}_3)$               | 33            | 100                      |
| Cloreto de amônio $(\text{NH}_4\text{Cl})$                 | 26            | 100                      |
| Cianamida de cálcio $(\text{CaCN}_2)$                      | 21            | 100                      |
| Nitrato de cálcio $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$             | 16            | 100                      |
| Nitrato de sódio $(\text{NaNO}_3)$                         | 16            | 100                      |
| Amônia anidra $(\text{NH}_3)$                              | 82            | 100                      |
| Nitrato de potássio $(\text{KNO}_3)$                       | 13            | 100                      |
| Fosfato monoamônico $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$   | 11            | 100                      |
| Fosfato diamônico $[(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4]$ | 18            | 100                      |

Fonte: Fageria (1989a, 2009) e Fageria e Baligar (2005a).

## Genótipos eficientes na absorção e utilização de N

O uso de genótipos eficientes na absorção e utilização de N é uma estratégia muito importante tanto para a redução de custo da produção como para a diminuição da degradação do meio ambiente. A eficiência do uso de nutrientes é definida de várias maneiras, como discutido anteriormente; algumas definições de planta eficiente no uso e absorção de nutrientes são apresentadas na Tabela 11. Porém, de maneira simples, a eficiência é a quantidade de grãos produzidos por unidade de N aplicado. Quanto maior for a relação, maior será a eficiência de utilização do nutriente pelos genótipos utilizados. Existem informações que mostram que os genótipos do feijão variam quanto à absorção e utilização de N (FAGERIA, 2002b; LYNCH; RODRIQUEZ, 1994; LYNCH; WHITE, 1992).

**Tabela 11.** Definições de plantas eficientes no uso de nutrientes.

| Definição                                                                                                                                                                                                                                         | Referência                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Uma planta eficiente no uso de nutrientes é aquela que absorve, transloca ou utiliza mais de um nutriente em comparação com outra planta, sob condições de baixa disponibilidade de nutrientes no solo ou no meio de crescimento                  | Soil Science Society of America (2008) |
| Um genótipo eficiente no uso de nutrientes, em comparação com o genótipo padrão, é definido como aquele que tem a habilidade de apresentar alta produtividade em um solo com disponibilidade limitada do nutriente                                | Graham (1984)                          |
| Genótipo eficiente é aquele que absorve grande quantidade de nutrientes do solo ou do fertilizante aplicado, apresenta alta produtividade de grãos por unidade de nutriente absorvido e acumula baixa quantidade de nutrientes na palha           | Isfan (1993)                           |
| Plantas eficientes são aquelas que apresentam alta produção de matéria seca ou maior aumento na produção de grãos por unidade de tempo, área ou nutriente aplicado e que não apresentam deficiência nutricional em comparação com a planta padrão | Clark (1990)                           |
| O genótipo eficiente, em comparação com o não eficiente, requer menos nutrientes nos processos metabólicos normais                                                                                                                                | Gourley et al. (1994)                  |
| Uma planta eficiente é definida como aquela que apresenta alta produtividade econômica com uma determinada quantidade de nutriente aplicado ou absorvido em comparação com outra planta em condições ambientais semelhantes                       | Fageria et al. (2008a)                 |

Diferenças significativas entre genótipos de feijão no uso de N podem ser observadas na Tabela 12. Houve efeito altamente significativo das doses de N e dos genótipos na produção de grãos. A interação entre esses dois fatores também foi significativa para a produção de grãos. Sob baixa dose de N, a produtividade variou de 1,3 g vaso<sup>-1</sup> a 9,7 g vaso<sup>-1</sup>, com média de 4,1 g vaso<sup>-1</sup>. Sob alta dose de N, a produtividade variou de

**Tabela 12.** Produtividade de grãos de 20 genótipos de feijoeiro cultivados em solo de Cerrado com e sem N.

| Genótipo       | Produtividade de grãos (g vaso <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                | Sem N                                                         | Com N (400 mg kg <sup>-1</sup> no solo) |
| Pérola         | 8,3ab                                                         | 22,5ab                                  |
| BRS Valente    | 1,6ab                                                         | 10,4b                                   |
| CNFM 6911      | 9,7a                                                          | 20,9ab                                  |
| CNFR 7552      | 1,9ab                                                         | 22,2ab                                  |
| BRS Radiante   | 3,5ab                                                         | 25,2ab                                  |
| Jalo Precoce   | 4,4ab                                                         | 19,6ab                                  |
| Diamante Negro | 4,1ab                                                         | 21,1ab                                  |
| CNFP 7624      | 1,4ab                                                         | 28,9ab                                  |
| CNFR 7847      | 8,5ab                                                         | 24,3ab                                  |
| CNFR 7866      | 2,0ab                                                         | 16,6ab                                  |
| CNFR 7865      | 6,2ab                                                         | 21,1ab                                  |
| CNFM 7875      | 1,3b                                                          | 28,1ab                                  |
| CNFM 7886      | 1,6ab                                                         | 26,9ab                                  |
| CNFC 7813      | 1,7ab                                                         | 27,3ab                                  |
| CNFC 7827      | 3,4ab                                                         | 31,8a                                   |
| CNFC 7806      | 2,9ab                                                         | 22,3ab                                  |
| CNFP 7677      | 4,4ab                                                         | 30,1ab                                  |
| CNFP 7775      | 3,8ab                                                         | 29,5ab                                  |
| CNFP 7777      | 7,8ab                                                         | 27,2ab                                  |
| CNFP 7792      | 2,5ab                                                         | 12,0ab                                  |
| Média          | 4,1                                                           | 23,4                                    |
| <b>Teste F</b> |                                                               |                                         |
| Dose de N (N)  |                                                               | **                                      |
| Genótipo (G)   |                                                               | **                                      |
| N versus G     |                                                               | **                                      |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2013).

10,4 g vaso<sup>-1</sup> a 31,8 g vaso<sup>-1</sup>, com média de 23,4 g vaso<sup>-1</sup>. Comparando a aplicação de N com a testemunha, observou-se um aumento de 471% na produtividade.

## **Controle das doenças, pragas e plantas daninhas**

As doenças, pragas e plantas daninhas são importantes fatores bióticos que determinam a eficiência de uso do N nas plantas. Esses fatores reduzem a área foliar, danificam o sistema radicular das plantas e, conseqüentemente, diminuem o processo fotossintético e a absorção de água e nutrientes. Todos esses efeitos negativos são responsáveis pela diminuição da eficiência de uso do N. Além disso, as plantas daninhas também competem por água, luz e nutrientes com as plantas cultivadas e são responsáveis pela diminuição da produtividade.

## **Fixação biológica**

As principais fontes de N para o feijoeiro são a matéria orgânica decomposta no solo, os adubos nitrogenados aplicados e a fixação biológica de N<sub>2</sub> atmosférico (FBN) pela associação do feijoeiro com bactérias do grupo dos rizóbios (HUNGRIA et al., 1997; MERCANTE et al., 1999). Além do elevado custo econômico, o uso de adubos nitrogenados em solos tropicais tem ainda custo ecológico adicional (PELEGRIN et al., 2009). Considera-se que haja em torno de 50% de perda de N decorrente da lixiviação, desnitrificação, volatilização e erosão, o que pode causar significativa poluição do meio ambiente (SIQUEIRA et al., 1994; STRALIOTTO et al., 2002). Por outro lado, estudos têm demonstrado que é possível que o feijoeiro se beneficie, em condições de campo, do processo de FBN, podendo alcançar produtividades acima de 2.500 kg ha<sup>-1</sup> (HUNGRIA et al., 2000).

A FBN é importante estratégia no aumento do uso do N e na redução do custo de produção e da degradação do meio ambiente. O processo envolve a conversão do N molecular (N<sub>2</sub>) atmosférico em amônio (realizada por bactérias, que crescem em associação com a planta hospedeira, o que gera benefícios mútuos, conforme apresentado por Fageria (1989) e o subsequente uso em diversos processos químico-biológicos do solo (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2008).

As bactérias capazes de infectar as raízes das leguminosas e estimular o desenvolvimento de nódulos<sup>2</sup> pertencem a várias espécies dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, *Sinorhizobium* e *Photorhizobium* (EPSTEIN; BLOOM, 2005).

Em relação à classificação taxonômica do rizóbio do feijoeiro, até 1984, estava definida uma única espécie: *Rhizobium leguminosarum* bv. *phaseoli* (JORDAN, 1984). Desde então, com o avanço nas técnicas de biologia molecular, foi possível constatar uma grande diversidade genética entre os microssimbiontes, permitindo, assim, a definição de novas espécies (CHUEIRE et al., 2003). Várias espécies de rizóbios são responsáveis pela FBN em feijoeiro: *Rhizobium etli*, *Rhizobium tropici*, *Rhizobium leguminosarum* bv. *phaseoli*, *Rhizobium gallicum* bv. *phaseoli* e *Rhizobium giardinii* bv. *phaseoli* (AMARGER et al., 1997; MARTINEZ ROMERO, 2003; MARTINEZ ROMERO et al., 1991; RODINO et al., 2011;

<sup>2</sup> Na formação dos nódulos, a primeira etapa é a liberação de produtos químicos pelas raízes na zona do sistema radicular da planta, o que atrai as bactérias. O principal produto é o trip-tofano, que é convertido pela bactéria em ácido indolacético (COBLEY, 1976). Na maioria das leguminosas, a infecção do *Rhizobium* ocorre através dos pelos das raízes que, na presença de uma bactéria apropriada, sujeitam-se à deformação ou ao encurvamento. Acreditava-se que o ácido indolacético era o produto que induzia o encurvamento (COBLEY, 1976), mas, atualmente, há dúvida sobre o seu papel no processo. De acordo com Alexander (1977), o *Rhizobium* sintetiza e excreta um ou mais produtos, que provocam deformação dos pelos radiculares da leguminosa. Dentre esses compostos, está incluído, provavelmente, um ácido nucleico e um polissacarídeo ou uma proteína. Em estado livre, as bactérias, em forma de bastonetes, podem ser móveis (flagelos) ou imóveis. A mobilidade é maior em solo rico em fósforo. A forma móvel passa pela parede celular epidérmica, mas esse mecanismo ainda não foi bem esclarecido. O canal (ou tubo) de infecção, que contém a bactéria móvel, é formado pelas paredes celulares da planta hospedeira por onde as bactérias passam. O canal alonga-se através do pelo radicular e, alcançando eventualmente a parte interna, a bactéria passa às células do córtex. O canal ramificado pode alcançar de um terço até a metade do córtex da raiz (FAGERIA, 1989). Uma vez instalada na célula tetraploide, uma ou mais bactérias são liberadas do canal infectado, mas ficam dentro da bainha do vacúolo formado pelo plasma da membrana do canal. Ocorre rápida divisão da bactéria e da célula tetraploide do hospedeiro, formando-se o nódulo. Dentro de 2 a 3 semanas, a bactéria torna-se livre do vacúolo infectado, perde a mobilidade e cessa a divisão, transformando-se num bacteroide. Nesse momento, ela começa a FBN: usa os carboidratos da planta hospedeira como fonte de energia para a redução do  $N_2$  para  $NH_3$ , mediante a enzima nitrogenase (COBLEY, 1976). O nódulo amadurecido possui forma característica, dependendo da espécie de leguminosa. Ele consiste numa camada externa (de células pequenas, contendo frações de tecido vascular) e numa região interna (de células grandes, que se tornam vacuoladas e que são preenchidas com bactérias). Após 8 a 10 semanas, os nódulos começam a se separar; as raízes caem e desintegram-se. As bactérias são liberadas no solo como células na forma de bastonetes livres e, nesse estado, se entram em contato com novo hospedeiro, podem infectá-lo (FAGERIA, 1989). A relação simbiótica entre bactéria e hospedeiro é muito delicada. Na falta de carboidratos para os nódulos, as bactérias passam a se comportar como parasitas e a consumir o N da planta hospedeira, em vez de fixá-lo da atmosfera. Embora a nodulação possa ocorrer normalmente, não há a FBN na ausência de P, Ca, Mg, molibdênio (Mo), cobalto (Co) e boro (B) no solo (FAGERIA, 1989).

RODRIGUEZ NAVARO et al., 2000; SEGOVIA et al., 1993). Eardly et al. (1995) relataram que ainda existem diversas estirpes sem posição taxonômica definida que podem representar novas espécies.

As bactérias vivem livremente no solo, mas fixam  $N_2$  somente em associação simbiótica com a leguminosa hospedeira. As raízes das plantas podem ser infectadas pelo *Rhizobium* em qualquer época, após a formação dos pelos radiculares (FAGERIA, 1989).

Os solos brasileiros, em geral, apresentam população abundante de rizóbios capazes de nodular e fixar  $N_2$  em simbiose com o feijoeiro. Stocco et al. (2008), em levantamento feito em Santa Catarina, verificaram que as populações de bactérias consistiram de 17,1% de *Rhizobium tropici*, 35,9% de *R. etli*, 32,5% de *R. leguminosarum*, 1,7% de *R. giardinii* e 12,8% com perfis distintos das espécies descritas de rizóbios de feijoeiro.

A quantidade de N fixada depende de vários fatores, como espécie de leguminosa, eficiência do *Rhizobium*, condições ambientais, temperatura, umidade, duração do dia, intensidade da radiação solar e fertilidade do solo. A quantidade de  $N_2$  fixado pelas leguminosas, em média, no mundo, é de  $118 \times 10^6 \text{ t ano}^{-1}$  (MENGEL et al., 2001). O feijoeiro apresenta FBN, mas a sua eficiência de fixação é geralmente baixa, sendo a fertilização nitrogenada, na maioria das vezes, recomendada para atender às exigências das plantas (OLIVEIRA et al., 2003). Estimativas das taxas de FBN obtidas em experimentos de campo realizados na América do Sul, na América Central e na África variaram de  $4 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $124 \text{ kg ha}^{-1}$  (HENSON, 1993; HUNGRIA; VARGAS, 2000).

Rufini et al. (2011) relataram que parte das exigências do feijoeiro-comum em relação ao N pode ser suprida pelo processo de FBN, por meio da simbiose estabelecida com bactérias fixadoras de N nodulíferas. Encontra-se, na Tabela 13, uma estimativa da quantidade de N fixado pelas leguminosas. A alfafa, o trevo, a soja e o guandu fixam maior quantidade do que as demais leguminosas.

### **Fatores que influenciam a fixação biológica de $N_2$**

A FBN assume papel importante na agricultura moderna, porque fornece N às plantas, sem nenhum custo para o produtor. Por isso, os fatores que influenciam o processo de fixação devem ser discutidos, a fim de aumentar a sua eficiência. Em condições ambientais adequadas, o  $N_2$  fixado por meio da simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*

**Tabela 13.** Estimativa da fixação biológica de N<sub>2</sub> (FBN) por algumas leguminosas.

| Leguminosa   | Bactéria associada    | Fixação biológica de N <sub>2</sub> estimada (kg de N ha <sup>-1</sup> ) |
|--------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Alfafa       | <i>Rhizobium</i>      | 150–250                                                                  |
| Trevo        | <i>Rhizobium</i>      | 100–150                                                                  |
| Lupino       | <i>Rhizobium</i>      | 50–100                                                                   |
| Feijão       | <i>Rhizobium</i>      | 50–150                                                                   |
| Feijão-caupi | <i>Bradyrhizobium</i> | 50–100                                                                   |
| Soja         | <i>Bradyrhizobium</i> | 150–280                                                                  |
| Amendoim     | <i>Bradyrhizobium</i> | 40–80                                                                    |
| Guandu       | <i>Bradyrhizobium</i> | 150–280                                                                  |
| Puerária     | <i>Bradyrhizobium</i> | 100–140                                                                  |

Fonte: adaptado de Brady e Weil (2002).

pode atender a parte das necessidades do feijoeiro (MARTINEZ ROMERO et al., 1991; PELEGRIN et al., 2009; SOARES et al., 2006; SOUZA et al., 2011; VALADÃO et al., 2009). Entretanto, os fatores relacionados principalmente às condições ambientais frequentemente limitam ou afetam o processo de FBN (SILVA et al., 2009; SOUZA et al., 2011; VIEIRA et al., 2005b). Denardin (1991), Martinez Romero et al. (1991) e Mercante (1993) relataram que fatores como a acidez do solo (pH) e baixa e alta concentrações de alumínio (Al) tóxico frequentemente limitam todas as etapas do processo de infecção das raízes, formação de nódulos e assimilação do N pela planta. Alguns desses fatores, que o homem já controla, podem ser manipulados em favor do processo, como discutido a seguir.

### **Temperatura**

Para as leguminosas das regiões tropicais ou subtropicais, como é o caso do feijoeiro no Brasil, a temperatura ideal para a FBN é de 25 °C a 30 °C, com máxima de 36 °C e mínima de 15 °C (GIBSON, 1971; LINDEMANN; HAM, 1979). Para as leguminosas das regiões temperadas, a temperatura ideal da rizosfera para a FBN é de 20 °C a 24 °C (GIBSON; JORDAN, 1983). Sem dúvida, o efeito da temperatura varia de espécie para espécie e de genótipo para genótipo de uma mesma espécie, tanto em



clima temperado como em tropical (FAGERIA, 1989; HARDY et al., 1968; WAUGHMAM, 1977). Algumas práticas que podem reduzir o risco de a temperatura atingir níveis muito baixos ou altos para a FBN são a escolha da época de semeadura, o uso de restos culturais na superfície do solo e a profundidade de semeadura. As culturas de inverno podem ser plantadas antes que a temperatura do solo caia a um nível que retarde a nodulação. A temperatura para formação dos nódulos é pouco superior à da FBN (GIBSON; JORDAN, 1983). O uso de restos culturais na superfície do solo baixa a temperatura (FAGERIA et al., 2011). A semeadura um pouco mais profunda do que a convencional também ajuda na formação dos nódulos em alta temperatura, mas, às vezes, diminui o estande e demanda maior quantidade de sementes por unidade de área (FAGERIA, 1989).

### ***Radiação solar***

Tanto o sombreamento como a alta intensidade de radiação solar prejudicam a formação dos nódulos e a FBN nas leguminosas. Esse assunto é discutido detalhadamente por Gibson e Jordan (1983).

### ***Umidade do solo***

A deficiência hídrica e o excesso de água são prejudiciais ao processo biológico de FBN. A nodulação é afetada pela redução da infecção dos pelos radiculares e pela supressão do desenvolvimento dos nódulos, quando o potencial de água atinge o limite de  $-3,6 \times 10^5$  Pa (WORRALL; ROUGHLEY, 1976). O baixo potencial de água no solo também restringe a movimentação do rizóbio (HAMDI, 1971) e, de acordo com Sprent (1976), reduz a atividade da nitrogenase graças à pouca difusão de  $O_2$  nos nódulos. O teor de umidade ideal para a nodulação e a FBN é igual à capacidade de campo de cada tipo de solo (SPRENT, 1972).

### ***Oxigênio ou aeração do solo***

As bactérias nos nódulos necessitam de energia para a fixação de  $N_2$  e de  $O_2$  para a oxidação de carboidratos (FAGERIA, 1989). A compactação do solo reduz o processo de FBN pelas leguminosas, informação que tem importância no sistema de plantio direto. A submergência ou inundação e a má estrutura do solo são responsáveis pelo baixo nível de  $O_2$ , causando redução na nodulação de várias espécies (GIBSON, 1977). Loveady (1963) observou que o *Trifolium subterraneum* nodulou muito

mal quando a taxa de difusão de  $O_2$  no solo era de  $8 \times 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ; com a taxa de difusão de  $O_2$  de  $20 \times 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , a nodulação foi satisfatória.

Deve-se lembrar que a FBN é uma hidrogenação, que ocorre em ambiente com baixo nível de  $O_2$ . Os nódulos, em que ocorre a FBN, contêm leghemoglobina, que está relacionada com as hemoglobinas do corpo animal. A função da leghemoglobina está associada ao transporte ativo de  $O_2$  para a bactéria, que fixa o  $N_2$  e, ao mesmo tempo, mantém baixa tensão de  $O_2$  perto do sistema enzimático da hidrogenação (RUSSELL, 1973).

### **Concentração de $CO_2$**

O aumento do nível de  $CO_2$  no ambiente aumenta a FBN e o crescimento de *Trifolium pratense* (FAGERIA, 1989), *Trifolium repens* (MASTERSON; SHERWOOD, 1978), *Glycine max* (HAVELKA; HARDY, 1976) e *Pisum sativum* (PHILLIPS et al., 1976). Essa resposta pode ser atribuída à alta taxa de fotossíntese na presença de alto nível de  $CO_2$  e, presumivelmente, ao aumento de fotossintatos translocados para as raízes (FAGERIA, 1989). No futuro, a projeção é de aumento da concentração de  $CO_2$  na atmosfera, o que pode aumentar a FBN pelas leguminosas.

### **pH do solo**

O pH do solo afeta o desenvolvimento das plantas e, consequentemente, a nodulação e a FBN. A acidez do solo é responsável pela toxicidade de  $Al^{3+}$  e  $H^+$ , que é prejudicial ao processo biológico de FBN. Muitas espécies não nodulam sob pH inferior a 4,5 e, acima desse nível, existe considerável diferença de resposta das espécies (MUNNS, 1977). Além disso, o pH afeta a absorção de nutrientes que são determinantes na FBN. Hungria e Vargas (2000) e Raza et al. (2001) relataram que o pH do solo constitui um dos principais fatores limitantes à sobrevivência das bactérias fixadoras de  $N_2$  nodulíferas (BFNN), à sua multiplicação, à nodulação e à FBN.

Algumas espécies de BFNN podem tolerar melhor a acidez do que outras, e essa tolerância pode variar entre estirpes de uma mesma espécie (HUNGRIA et al., 1997). As BFNN crescem sob uma faixa de pH entre 6,0 a 7,0, e poucas crescem bem sob pH menor do que 5,0 (ALI et al., 2009; GRAHAM et al., 1994; RODRIGUES et al., 2006). Para maximizar a

contribuição da FBN para o feijoeiro-comum em solos ácidos, é necessário que as estirpes de BFNN utilizadas nos inoculantes sejam adaptadas a essa condição, competitivas e eficientes no processo de infecção (RUFINI et al., 2011). Estirpes de crescimento rápido geralmente são menos tolerantes à acidez do que as de crescimento lento (GRAHAM et al., 1994; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Algumas estirpes de crescimento rápido do gênero *Rhizobium* são tolerantes ao pH mais ácido, como a *Rhizobium loti* (atualmente *Mesorhizobium loti*), a *Rhizobium meliloti* e a *Rhizobium tropici* (GRAHAM et al., 1994). A origem das estirpes e sua tolerância à acidez também parecem ter boa correlação, ou seja, estirpes isoladas de solos ácidos mostram-se mais adaptadas a essas condições do que as isoladas de solos com pH mais elevado (HUNGRIA et al., 2000).

### **Fertilidade do solo**

A FBN nos nódulos é ativa se a planta for suprida adequadamente com os nutrientes essenciais ao seu crescimento e desenvolvimento. O Ca é necessário à infecção das raízes, o B para o desenvolvimento do tecido vascular, o Mo e o Fe para a atividade da enzima nitrogenase e o P para alto nível de ATP, indispensável durante a atividade da nitrogenase (GIBSON; JORDAN, 1983). Outros nutrientes, como K, S e muitos micronutrientes, também influenciam a nodulação e o crescimento das plantas noduladas (FAGERIA, 1989). Tsai et al. (1993) relataram que as condições edafoclimáticas, particularmente a disponibilidade de N na solução do solo na fase inicial da cultura, podem influenciar a magnitude da FBN. A deficiência de P é também relatada como um dos principais fatores que limitaram a FBN em feijoeiro (DREVON; HARTWIG, 1997; RIBET; DREVON, 1995, 1996; VADEZ et al., 1996) e causaram a sua diminuição na fase final do ciclo da cultura (JENSEN, 1987).

### **Aplicação de nitrogênio**

O efeito inibitório dos fertilizantes nitrogenados na simbiose entre leguminosas e rizóbio, especialmente do nitrato, é muito bem conhecido, e existe vasta literatura sobre o assunto (FAGERIA, 1989; GIBSON, 1977; MUNNS, 1977). Pelo menos quatro aspectos simbióticos são afetados: infecção, desenvolvimento de nódulos, FBN e integração de bacteroides (FAGERIA, 1989). Dependendo da concentração, o nitrato retarda ou inibe a infecção dos pelos do sistema radicular. Esse efeito pode ser eliminado pela aplicação correta de ácido indol-3-acético (MUNNS, 1977).

O retardamento do desenvolvimento dos nódulos e da FBN pelo nitrato são atribuídos à falta de fotossintatos nos nódulos pela competição com as raízes e folhas (OGHOGHORIE; PATE, 1971; SMALL; LEONARD, 1969). Apesar do efeito inibitório, a aplicação de N pode promover o crescimento da planta e a FBN. Isso pode ocorrer graças à correção da deficiência de N no estágio inicial do crescimento da planta, antes que os nódulos sejam capazes de fornecer N suficiente para atender à necessidade da planta (GIBSON, 1976). Pode também promover a nodulação e a FBN graças ao melhor desenvolvimento da planta em relação ao desenvolvimento quando totalmente dependente da FBN (MINCHIN et al., 1981).

### ***Uso de defensivos agrícolas***

O uso de defensivos agrícolas destina-se principalmente ao controle de doenças, pragas e plantas daninhas, mas seu efeito, principalmente dos fungicidas, pode ser prejudicial ao rizóbio. Resultados obtidos nesse sentido são bastante controvertidos e necessitam de estudo para cada fungicida em relação a cada espécie de rizóbio (FAGERIA, 1989). Para evitar o efeito prejudicial dos fungicidas, uma das alternativas é a aplicação dos inoculantes no sulco, separados da semente. O fungicida sistêmico pode representar perigo por causa do ingrediente ativo que libera na planta e que pode matar ou inibir a atividade das bactérias nos nódulos (GIBSON; JORDAN, 1983). O efeito dos inseticidas e herbicidas não é tão prejudicial. Às vezes, esses dois defensivos podem reduzir a nodulação, mas não chegam a nível prejudicial significativo se aplicados em doses certas e por método apropriado (FAGERIA, 1989).

### **Resultados de pesquisa sobre a influência do N e do inoculante**

Fageria et al. (2012) avaliaram as respostas de 15 genótipos de feijoeiro à aplicação de fertilizante nitrogenado e à inoculação das sementes com rizóbio. A produção de matéria seca da parte aérea foi significativamente influenciada por esses dois fatores (Tabela 14). Houve interação significativa entre N e genótipos, o que sugere mudança na resposta dos genótipos com a mudança das doses de N e inoculação com rizóbio. Na média dos tratamentos com N e rizóbio, a máxima massa da matéria seca da parte aérea foi produzida pelo genótipo Diamante Negro e a mínima pelo BRSMG Talismã. Na média dos 15 genótipos, a inoculação aumentou em 17% a massa da matéria seca da parte aérea em comparação com a da testemunha. Com a aplicação de 200 mg de N kg<sup>-1</sup>, houve aumento

**Tabela 14.** Massa da matéria seca da parte aérea (g planta<sup>-1</sup>) de 15 genótipos de feijoeiro sob diferentes doses de nitrogênio (N) e inoculante.

| Genótipo                         | Produção de matéria seca da parte aérea (g planta <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |                                    |                                    |                                    |        |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------|
|                                  | Dose N <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>                                               | Dose N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup> | Dose N <sub>2</sub> <sup>(4)</sup> | Dose N <sub>3</sub> <sup>(5)</sup> | Média  |
| Aporé                            | 4,45hi                                                                           | 5,59cd                             | 4,18gh                             | 5,44g                              | 4,91h  |
| Pérola                           | 6,21defg                                                                         | 6,36c                              | 7,57ab                             | 9,27bcd                            | 7,25de |
| BRSMG Talismã                    | 4,83gh                                                                           | 6,49c                              | 3,79h                              | 3,47h                              | 4,64h  |
| BRS Requite                      | 6,74cde                                                                          | 6,83c                              | 4,85fgh                            | 10,85b                             | 7,32de |
| BRS Pontal                       | 3,26i                                                                            | 6,56c                              | 5,72defg                           | 7,98de                             | 5,88g  |
| BRS 9435 Cometa                  | 6,62cdef                                                                         | 6,46c                              | 4,71fgh                            | 9,89bc                             | 6,91ef |
| BRS Estilo                       | 5,11fgh                                                                          | 6,48c                              | 4,42fgh                            | 6,97efg                            | 5,74g  |
| CNFC 10408                       | 7,47bcd                                                                          | 10,89a                             | 5,53efg                            | 7,14ef                             | 7,75cd |
| CNFC 10470                       | 6,66cdef                                                                         | 6,38c                              | 3,59h                              | 9,10cd                             | 6,43fg |
| Diamante Negro                   | 10,47a                                                                           | 10,78a                             | 7,23abcd                           | 12,96a                             | 10,36a |
| Corrente                         | 6,23defg                                                                         | 4,45d                              | 7,17abcd                           | 6,19fg                             | 6,01g  |
| BRS Valente                      | 5,26efgh                                                                         | 9,13b                              | 5,93cdef                           | 9,54bcd                            | 7,46de |
| BRS Grafite                      | 8,08bc                                                                           | 10,28ab                            | 8,63a                              | 10,19bc                            | 9,29b  |
| BRS Marfim                       | 8,94ab                                                                           | 10,92a                             | 7,48abc                            | 5,99fg                             | 8,33c  |
| BRS Agreste                      | 6,89cd                                                                           | 5,66cd                             | 6,82bcde                           | 6,28efg                            | 6,41fg |
| Média                            | 6,48c                                                                            | 7,55b                              | 5,84d                              | 8,08a                              |        |
| <b>Teste F</b>                   |                                                                                  |                                    |                                    |                                    |        |
| Dose de N (N)                    | **                                                                               |                                    |                                    |                                    |        |
| Genótipo (G)                     | **                                                                               |                                    |                                    |                                    |        |
| N versus G                       | **                                                                               |                                    |                                    |                                    |        |
| Coeficiente de variação (%) de N | 8,54                                                                             |                                    |                                    |                                    |        |
| Coeficiente de variação (%) de G | 7,58                                                                             |                                    |                                    |                                    |        |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

<sup>(2)</sup> N<sub>0</sub> = Sem N.

<sup>(3)</sup> N<sub>1</sub> = Sem N + com inoculante.

<sup>(4)</sup> N<sub>2</sub> = Com inoculante + 50 kg de N ha<sup>-1</sup>.

<sup>(5)</sup> N<sub>3</sub> = 200 mg de N kg<sup>-1</sup>.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2012).

de 25% da massa da matéria seca em comparação com a da testemunha. Crusciol et al. (2007) e Santos e Fageria (2008) relataram aumento na massa da matéria seca da parte aérea do feijoeiro com a adubação nitrogenada.

Pelegrin et al. (2009) relataram que a adubação com 20 kg de N ha<sup>-1</sup>, acrescida de inoculação com a estirpe de *Rhizobium tropici* CIAT 899, possibilitou a obtenção de produtividade de grãos na cultura do feijoeiro equivalente à aplicação de até 160 kg de N ha<sup>-1</sup>. Na Tabela 15,

**Tabela 15.** Índice de eficiência de produção de grãos (IEPG) e classificação de 15 genótipos de feijoeiro no uso de nitrogênio (N)<sup>(1)</sup>.

| Genótipo        | Índice de eficiência de produção de grãos (IEPG <sup>(2)</sup> ) |
|-----------------|------------------------------------------------------------------|
| Aporé           | 0,46 IE                                                          |
| Pérola          | 1,09 E                                                           |
| BRSMG Talismã   | 0,32 IE                                                          |
| BRS Requite     | 1,40 E                                                           |
| BRS Pontal      | 3,49 E                                                           |
| BRS 9435 Cometa | 1,24 E                                                           |
| BRS Estilo      | 0,68 ME                                                          |
| CNFC 10408      | 1,01 E                                                           |
| CNFC 10470      | 1,16 E                                                           |
| Diamante Negro  | 2,59 E                                                           |
| Corrente        | 0,73 ME                                                          |
| BRS Valente     | 0,95 ME                                                          |
| BRS Grafite     | 1,57 E                                                           |
| BRS Marfim      | 1,02 E                                                           |
| BRS Agreste     | 0,82 ME                                                          |
| Média           | 1,23                                                             |

<sup>(1)</sup> E = eficiente, ME = moderadamente eficiente e IE = ineficiente.

<sup>(2)</sup>  $IEPG = PG_1/PG_2 \times PGX_1/PGX_2$ , em que  $PG_1$  = produção de grãos na dose zero de N,  $PG_2$  = produção média de grãos na dose zero de N,  $PGX_1$  = produção de grãos na dose de 200 mg de N kg<sup>-1</sup> e  $PGX_2$  = produção média de grãos na dose de 200 mg de N kg<sup>-1</sup>.

Fonte: Fageria et al. (2012).

são apresentados resultados da classificação de 15 genótipos no uso de N. Com base no índice de eficiência de produção de grãos, os genótipos foram classificados como eficientes, moderadamente eficientes e ineficientes no uso de N. Os genótipos Pérola, BRS Requite, BRS Pontal, BRS 9435 Cometa, CNFC 10408, CNFC 10470, Diamante Negro, BRS Grafite e BRS Marfim foram classificados como eficientes no uso de N. Os genótipos BRS Estilo, Corrente, BRS Valente e BRS Agreste foram moderadamente eficientes. Os genótipos Aporé e BRS Talismã foram ineficientes no uso de N.

A produção de grãos aumentou significativamente com a aplicação dos tratamentos com N e inoculação de rizóbio (Tabela 16). A interação entre doses de N e genótipos também foi significativa para a produção de grãos, o que indica respostas diferenciais dos genótipos com a mudança nos tratamentos. Na média de quatro tratamentos (combinação de diferentes doses de N e presença ou ausência de inoculante), a máxima produção de grãos foi obtida com o genótipo Diamante Negro e a mínima com o genótipo BRSMG Talismã. A produção máxima de grãos foi obtida com a aplicação de 200 mg de N kg<sup>-1</sup> no solo. Não houve aumento na produção de grãos com a inoculação de rizóbio e aplicação de 50 mg de N kg<sup>-1</sup> no solo. Resposta diferencial de genótipos de feijoeiro com aplicação de N foi relatada por Fageria e Santos (2008). Os mesmos genótipos produziram matéria seca da parte aérea nas quantidades máxima e mínima, respectivamente. Isso significa que existe relação positiva entre massa da matéria seca da parte aérea e produção de grãos. Fageria et al. (2004), Fageria e Baligar (2005) e Fageria e Barbosa Filho (2008) relataram relação positiva entre a massa da matéria seca da parte aérea e a produção de grãos em feijoeiro. Com base nos dados do ensaio em casa de vegetação, pode-se concluir que houve resposta significativa na produção de matéria seca da parte aérea e na produção de grãos com a aplicação de doses de N e inoculação com rizóbio no feijão cultivado em solo de várzea, porém a resposta variou de genótipo para genótipo. As produções de matéria seca e de grãos com a inoculação aumentaram, mas não atingiram os índices obtidos com a aplicação de 200 mg de N kg<sup>-1</sup>, o que significa que o feijoeiro precisa de adubação nitrogenada para obter alta produtividade. Nas Figuras 8 e 9, pode-se observar as respostas de dois genótipos de feijoeiro sem e com a aplicação de 200 mg de N kg<sup>-1</sup>. As Figuras 10 e 11 ilustram o desenvolvimento do sistema radicular sob tratamentos com aplicação de N e inoculação de rizóbio.

**Tabela 16.** Produção de grãos ( $\text{g planta}^{-1}$ ) de 15 genótipos de feijoeiro sob doses de nitrogênio (N) e inoculante.

| Genótipo                          | Produção de grãos ( $\text{g planta}^{-1}$ ) <sup>(1)</sup> |                               |                               |                               |          |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|
|                                   | N <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>                               | N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup> | N <sub>2</sub> <sup>(4)</sup> | N <sub>3</sub> <sup>(5)</sup> | Média    |
| Aporé                             | 7,19de                                                      | 5,71g                         | 8,54d                         | 11,10de                       | 8,13f    |
| Pérola                            | 11,30a                                                      | 11,05bc                       | 8,41d                         | 13,16bc                       | 10,98bc  |
| BRSMG Talismã                     | 8,90bcd                                                     | 5,28g                         | 5,42e                         | 4,57g                         | 6,04g    |
| BRS Requite                       | 11,71a                                                      | 10,37cd                       | 8,13d                         | 16,56a                        | 11,69ab  |
| BRS Pontal                        | 5,57e                                                       | 11,00bc                       | 8,31d                         | 14,04b                        | 9,73de   |
| BRS 9435 Cometa                   | 10,50abc                                                    | 9,20cde                       | 8,62d                         | 9,54ef                        | 9,46e    |
| BRS Estilo                        | 7,28de                                                      | 11,25bc                       | 9,09cd                        | 12,67bcd                      | 10,07cde |
| CNFC 10408                        | 8,82bcd                                                     | 10,03cde                      | 10,84bc                       | 7,71f                         | 9,35e    |
| CNFC 10470                        | 8,55cd                                                      | 13,68a                        | 9,60cd                        | 14,29b                        | 11,53ab  |
| Diamante Negro                    | 8,55cd                                                      | 13,58a                        | 13,33a                        | 14,25b                        | 12,43a   |
| Corrente                          | 11,38a                                                      | 8,36de                        | 8,90cd                        | 11,48cde                      | 10,03cde |
| BRS Valente                       | 7,59de                                                      | 12,90ab                       | 5,76e                         | 13,49b                        | 9,93de   |
| BRS Grafite                       | 11,22a                                                      | 6,10fg                        | 9,67cd                        | 10,83de                       | 9,45e    |
| BRS Marfim                        | 10,88ab                                                     | 8,12ef                        | 8,40d                         | 10,57e                        | 9,49de   |
| BRS Agreste                       | 8,71cd                                                      | 10,79c                        | 11,71ab                       | 10,70de                       | 10,47cd  |
| Média                             | 9,21c                                                       | 9,83b                         | 8,98c                         | 11,66a                        |          |
| <b>Teste F</b>                    |                                                             |                               |                               |                               |          |
| Dose de N (N)                     |                                                             |                               | **                            |                               |          |
| Genótipo (G)                      |                                                             |                               | **                            |                               |          |
| N versus G                        |                                                             |                               | **                            |                               |          |
| Coefficiente de variação (%) de N |                                                             |                               | 3,39                          |                               |          |
| Coefficiente de variação (%) de G |                                                             |                               | 7,03                          |                               |          |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

<sup>(2)</sup> N<sub>0</sub> = Sem N.

<sup>(3)</sup> N<sub>1</sub> = Sem N + com inoculante.

<sup>(4)</sup> N<sub>2</sub> = Inoculante + 50 kg de N ha<sup>-1</sup>.

<sup>(5)</sup> N<sub>3</sub> = 200 mg de N kg<sup>-1</sup>.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2012).



Foto: Sebastião Araújo



**Figura 8.** Resposta do genótipo BRS Requite de feijoeiro à aplicação de nitrogênio (N).

Fonte: Fageria et al. (2012).

Foto: Sebastião Araújo.



**Figura 9.** Resposta do genótipo BRS Estilo de feijoeiro à aplicação de nitrogênio (N).

Fonte: Fageria et al. (2012).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 10.** Sistema radicular do genótipo BRS Pontal de feijoeiro sob tratamentos com nitrogênio (N) e inoculação de rizóbio. Fonte: Fageria et al. (2012).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 11.** Sistema radicular do genótipo CNFC 10470 sob tratamentos com nitrogênio (N).

Fonte: Fageria et al. (2012).

Os mesmos genótipos foram avaliados em condições de campo, e os resultados são apresentados na Tabela 17. A produtividade de grãos aumentou significativamente com a aplicação de adubação nitrogenada. Houve interação significativa entre N e o genótipo, o que significa resposta diferencial dos genótipos com a mudança dos tratamentos com N e rizóbio. A produtividade de grãos variou de 1.610 kg ha<sup>-1</sup>, obtida com o genótipo Corrente, a 2.250 kg ha<sup>-1</sup>, obtida com o genótipo BRS 9435 Cometa, com média de 1.963 kg ha<sup>-1</sup> sob o tratamento N<sub>0</sub>. Sob o tratamento N<sub>1</sub> (inoculação com rizóbio), a produtividade de grãos variou de 1.738 kg ha<sup>-1</sup>, obtida com o genótipo BRS Grafite, a 3.350 kg ha<sup>-1</sup>, obtida com o CNFC 10408, com média de 2.677 kg ha<sup>-1</sup>. Sob o tratamento N<sub>2</sub> (inoculante + 50 kg de N ha<sup>-1</sup>), a produtividade variou de 2.473 kg ha<sup>-1</sup>, com o genótipo CNFC 10408, a 3.660 kg ha<sup>-1</sup>, com o Pérola, com média de 3.049 kg ha<sup>-1</sup>. O tratamento N<sub>3</sub> produziu de 2.323 kg ha<sup>-1</sup> a 4.193 kg ha<sup>-1</sup>, com média de 3.464 kg ha<sup>-1</sup>.

Na média dos quatro tratamentos, a produtividade variou de 2.236 kg ha<sup>-1</sup>, obtida com o genótipo BRS Grafite, a 3.100 kg ha<sup>-1</sup>, com o BRS Agreste. Na média dos 15 genótipos, a produtividade aumentou em 36% sob o tratamento com inoculação, 55% sob o tratamento com inoculação + 50 kg de N ha<sup>-1</sup> e 77% com a aplicação de 120 kg de N ha<sup>-1</sup> em comparação ao tratamento controle (0 kg de N ha<sup>-1</sup>). Fageria e Santos (2008) relataram diferença significativa na produtividade de genótipos de feijão com a aplicação de N. Dowling e Broughton (1986) relataram que, para obtenção de altas produções de feijão, é necessária a aplicação de fertilizantes nitrogenados, uma vez que os rizóbios nativos apresentam, em geral, baixa eficiência simbiótica. Além disso, tem sido relatada a ausência de resposta à inoculação em experimentos realizados no campo (RAMOS; BODDEY, 1987).

A eficiência de uso do N variou de 10,20 kg a 43,47 kg de grãos produzidos por kg de N aplicado com a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 18). Com a aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup>, a eficiência de uso do N variou de 2,33 kg a 24,87 kg de grãos produzidos por kg de N aplicado. Na média das duas doses de N, a eficiência de uso de N dos 15 genótipos variou de 10,69 kg kg<sup>-1</sup> a 33,33 kg kg<sup>-1</sup>. A eficiência de uso do N diminuiu com o aumento das doses de N. Fageria (1992) relatou que a eficiência de uso dos nutrientes, inclusive do N, diminui com o aumento da dose desses nutrientes.

**Tabela 17.** Produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) dos genótipos de feijoeiro sob tratamentos com nitrogênio (N) e rizóbio.

| Genótipo                          | Produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) <sup>(1)</sup> |                                    |                                    |                                    |           |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------|
|                                   | Dose N <sub>0</sub> <sup>(2)</sup>                            | Dose N <sub>1</sub> <sup>(3)</sup> | Dose N <sub>2</sub> <sup>(4)</sup> | Dose N <sub>3</sub> <sup>(5)</sup> | Média     |
| Aporé                             | 1.913b                                                        | 3.217ab                            | 4.086a                             | 2.689fg                            | 2.976abc  |
| Pérola                            | 1.730bc                                                       | 3.172ab                            | 3.660abc                           | 3.229cdef                          | 2.948abc  |
| BRSMG Talismã                     | 1.884b                                                        | 2.642abcd                          | 2.954bcd                           | 3.103defg                          | 2.646abcd |
| BRS Requite                       | 2.008ab                                                       | 2.847abcd                          | 2.873bcd                           | 2.652fg                            | 2.595bcd  |
| BRS Pontal                        | 2.020ab                                                       | 1.870cd                            | 2.848bcd                           | 3.890bcd                           | 2.657bcd  |
| BRS 9435 Cometa                   | 2.250c                                                        | 2.583abcd                          | 2.489d                             | 4.135ab                            | 2.864abcd |
| BRS Estilo                        | 1.955ab                                                       | 1.800cd                            | 2.673cd                            | 4.855a                             | 2.821abcd |
| CNFC 10408                        | 1.760b                                                        | 3.350bcd                           | 2.473d                             | 3.435bcdef                         | 2.755abcd |
| CNFC 10470                        | 2.090ab                                                       | 2.823abcd                          | 2.940bcd                           | 3.732bcde                          | 2.896abcd |
| Diamante Negro                    | 2.518a                                                        | 2.390bcd                           | 3.862ab                            | 2.869efg                           | 2.910abcd |
| Corrente                          | 1.610bc                                                       | 3.675a                             | 2.701cd                            | 4.084abc                           | 3.018abc  |
| BRS Valente                       | 2.069ab                                                       | 1.921cd                            | 2.579d                             | 2.720fg                            | 2.322d    |
| BRS Grafite                       | 2.043ab                                                       | 1.738d                             | 2.841bcd                           | 2.323g                             | 2.236d    |
| BRS Marfim                        | 1.937ab                                                       | 2.903abc                           | 3.289abcd                          | 4.193ab                            | 3.081ab   |
| BRS Agreste                       | 1.659bc                                                       | 3.227ab                            | 3.471abcd                          | 4.044abc                           | 3.100a    |
| Média                             | 1.963d                                                        | 2.677c                             | 3.049b                             | 3.464a                             |           |
| <b>Teste F</b>                    |                                                               |                                    |                                    |                                    |           |
| Dose de N (N)                     | **                                                            |                                    |                                    |                                    |           |
| Genótipo (G)                      | **                                                            |                                    |                                    |                                    |           |
| N versus G                        | **                                                            |                                    |                                    |                                    |           |
| Coeficiente de variação (%) de N) | 11,63                                                         |                                    |                                    |                                    |           |
| Coeficiente de variação (%) de G) | 14,94                                                         |                                    |                                    |                                    |           |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

<sup>(2)</sup> N<sub>0</sub> = Sem N.

<sup>(3)</sup> N<sub>1</sub> = Sem N + com inoculante.

<sup>(4)</sup> N<sub>2</sub> = Com inoculante + 50 kg de N ha<sup>-1</sup>.

<sup>(5)</sup> N<sub>3</sub> = 120 kg de N ha<sup>-1</sup>.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2012).

**Tabela 18.** Eficiência de uso do nitrogênio (N) (kg kg<sup>-1</sup>) por genótipos de feijoeiro sob duas doses de N.

| Genótipo                         | Eficiência de uso de N (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(1) (2)</sup> |                              |          |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------|
|                                  | 50 kg de N ha <sup>-1</sup>                                      | 120 kg de N ha <sup>-1</sup> | Média    |
| Aporé                            | 43,47a                                                           | 6,46efg                      | 33,33a   |
| Pérola                           | 38,61ab                                                          | 12,49cdef                    | 22,54bc  |
| BRSMG Talismã                    | 21,39bcd                                                         | 10,16defg                    | 16,94bcd |
| BRS Requite                      | 17,30bcd                                                         | 5,37fg                       | 13,73cd  |
| BRS Pontal                       | 16,57cd                                                          | 15,58bcd                     | 10,97d   |
| BRS 9435 Cometa                  | 26,77abcd                                                        | 24,87a                       | 21,17bcd |
| BRS Estilo                       | 14,37d                                                           | 24,17a                       | 19,46bcd |
| CNFC 10408                       | 14,26d                                                           | 13,96bcde                    | 19,21bcd |
| CNFC 10470                       | 16,98bcd                                                         | 13,67bcde                    | 15,47cd  |
| Diamante Negro                   | 26,88abcd                                                        | 2,93g                        | 20,27bcd |
| Corrente                         | 21,82abcd                                                        | 20,62ab                      | 12,38cd  |
| BRS Valente                      | 10,20d                                                           | 5,43fg                       | 15,41cd  |
| BRS Grafite                      | 15,96cd                                                          | 2,33g                        | 10,69d   |
| BRS Marfim                       | 27,03abcd                                                        | 18,79abc                     | 14,68cd  |
| BRS Agreste                      | 36,24abc                                                         | 19,87abc                     | 27,51ab  |
| Média                            | 23,17a                                                           | 13,33b                       |          |
| <b>Teste F</b>                   |                                                                  |                              |          |
| Dose de N (N)                    |                                                                  | **                           |          |
| Genótipos (G)                    |                                                                  | **                           |          |
| N versus G                       |                                                                  | **                           |          |
| Coeficiente de variação (%) de N |                                                                  | 18,57                        |          |
| Coeficiente de variação (%) de G |                                                                  | 15,60                        |          |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

<sup>(2)</sup> Fórmula para cálculo da eficiência de uso de N:

*Eficiência de uso de N (kg kg<sup>-1</sup>) = Produtividade a 50 kg de N ou 120 kg de N – Produtividade de 0 kg de N / Quantidade de N aplicado*

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Com base nesse trabalho, pode-se concluir que houve resposta significativa da produtividade de grãos e da eficiência de uso de N, mas a resposta variou de genótipo para genótipo e diminuiu com o aumento da dose de N. Na média de 15 genótipos e duas doses de N, a eficiência foi de 18,25 kg de grãos produzidos por kg de N aplicado. A produtividade máxima de grãos foi obtida com a aplicação de 120 kg de N ha<sup>-1</sup> seguida da produtividade resultante do tratamento com inoculação + 50 kg de N ha<sup>-1</sup> (Figuras 12 a 14).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 12.** Resposta do genótipo Diamante Negro de feijoeiro aos tratamentos: sem N (A); com inoculante e sem N (B); com inoculante e 50 kg de N ha<sup>-1</sup> (C); e com 120 kg de N ha<sup>-1</sup> (D).

### Uso do clorofilômetro

Como os agricultores não dispõem de resultados da análise da planta ou de outro método de orientação, a adubação nitrogenada mineral é quantificada pela análise visual da lavoura ou é baseada numa



Foto: Sebastião Araújo



**Figura 13.** Resposta do genótipo Pérola de feijoeiro aos tratamentos: sem N (A); com inoculante e sem N (B); com inoculante e 50 kg de N ha<sup>-1</sup> (C); e com 120 kg de N ha<sup>-1</sup> (D).

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 14.** Resposta do genótipo BRS Valente de feijoeiro aos tratamentos: sem N (A); com inoculante e sem N (B); com inoculante e 50 kg de N ha<sup>-1</sup> (C); e com 120 kg de N ha<sup>-1</sup> (D).

recomendação geral. De modo geral, as recomendações atuais para o uso de N em cobertura nas culturas anuais seguem as estratégias de manejo tradicionais: a dose é baseada em curvas de resposta da cultura ao N, e a época de aplicação em cobertura é predeterminada, não levando em consideração as necessidades e a fase de maior demanda da planta. A falta de sincronismo entre a época de aplicação do N e a época de maior demanda da planta tem propiciado baixa eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados na produção das culturas. Em consequência da predefinição das doses e das épocas de aplicação do N em cobertura nas culturas anuais, a dose de N usada pode ser sub ou superestimada, o que acarreta, por um lado, queda da produtividade de grãos e, por outro, aumento dos custos pelo uso desnecessário de fertilizantes. Isso leva à diminuição de lucro do agricultor e ao impacto negativo ao ambiente pela lixiviação de nitrato, ou seja, ao risco de poluição ambiental.

O diagnóstico correto de N na planta torna-se, então, essencial para o adequado manejo desse nutriente. A maioria dos métodos disponíveis para essa avaliação são onerosos, destrutivos e demorados. Como alternativa aos métodos convencionais de adubação em cobertura, estudos de teste rápido com o auxílio de um clorofilômetro [um aparelho portátil que gera grandezas relacionadas com os teores de clorofila presentes na folha (Figura 15)] têm sido realizados com muito sucesso em vários países para monitorar o status de N em plantas e determinar a época adequada para sua aplicação em cereais, como arroz (BALASUBRAMANIAN et al., 2000; HUSSAIN et al., 2000; PENG et al., 1993; STALIN et al., 2000; TURNER; JUND, 1991), milho (ARGENTA et al., 2001a, 2001b, 2002; PIEKIELEK; FOX, 1992;), trigo e aveia (BREDEMEIER, 1999), e outras culturas anuais, como feijão (BARBOSA FILHO et al., 2009; FURLANI JÚNIOR et al., 1996; SILVEIRA, et al., 2003; STONE et al., 2002) e algodão (WOOD et al., 1992). Com o desenvolvimento do medidor portátil de clorofila para realização de leituras instantâneas do seu teor relativo na folha, sem haver necessidade de sua destruição, surge uma nova ferramenta para avaliação do nível de N nas plantas (ARGENTA et al., 2001a, 2001b). O uso do clorofilômetro tem dado resultados mais positivos (apresentando, em geral, maior eficiência agrônômica do N aplicado) do que as práticas convencionais, baseadas em épocas prefixadas para aplicação do N em cobertura.

O teor de clorofila, na maioria das vezes, correlaciona-se positivamente com o teor de N foliar graças ao fato de esse nutriente constituir



Foto: Sebastião Araújo



**Figura 15.** Medidor de clorofila ou clorofilômetro, modelo SPAD-502.

parte de sua molécula. Dessa forma, o clorofilômetro monitora, de forma indireta, instantânea e não destrutiva, o estado nutricional de N na cultura, podendo ser utilizado para estimar a necessidade de adubação nitrogenada de cobertura em diversos estádios de desenvolvimento.

Para melhorar o sincronismo entre a época de aplicação do N e a época de maior demanda da planta, o monitoramento dos teores de N e de clorofila na folha por meio do uso de clorofilômetro tem sido sugerido, pois esses teores se correlacionam positivamente entre si e com a produtividade de grãos.

O teor de clorofila na folha é usado para prever o nível nutricional de N em plantas, pois a quantidade desse pigmento correlaciona-se positivamente com o N na planta (ARGENTA et al., 2001b; SILVEIRA, et al., 2003). A vantagem da medição do teor relativo de clorofila (TRC) é a de

não ser influenciada pelo “consumo de luxo” de N pela planta, sob a forma de nitrato (BLACKMER; SCHEPERS, 1995). A baixa sensibilidade do medidor de clorofila ao “consumo de luxo” de N pelas plantas é atribuída à forma com que esse nutriente se encontra na folha. Quando absorvido em excesso, acumula-se como nitrato. Nessa forma, o N não se associa à molécula de clorofila e, portanto, não pode ser quantificado pelo medidor de clorofila (DWYER et al., 1995). Por apresentar baixa sensibilidade a esse tipo de consumo de N, a medição efetuada pelo medidor de clorofila está sendo considerada melhor indicadora do nível desse nutriente do que as medições do seu teor (BLACKMER; SCHEPERS, 1995).

Blackmer et al. (1993) observaram que outros fatores além da disponibilidade de N, como idade, teor de água na planta, população de plantas, cultivar, disponibilidade de outros nutrientes, estresse ambiental ou fatores bióticos, podem afetar as medições de intensidade da cor verde da folha pelo medidor de clorofila. Os níveis críticos variam em função do teto de produtividade de grãos dos experimentos, sendo recomendada a realização de experimentos em diferentes ambientes e em distintas situações de manejo (BREDEMEIER, 1999). Para minimizar a influência dos fatores citados, tem sido recomendado um método de normalização das leituras do clorofilômetro para cada área de cultivo, estágio de desenvolvimento, condição edafoclimática e prática de manejo (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; HUSSAIN, et al., 2000; SCHEPERS et al., 1992; WASKOM et al., 1996). Uma forma de normalizar as leituras é determinar um índice de suficiência, que é obtido pela média das leituras do clorofilômetro nas amostras dividida pela média das leituras do aparelho na área de referência. Essa área de referência é uma faixa da lavoura, com a mesma cultivar, adubada com uma quantidade de N bastante superior à do restante da lavoura, de forma que, teoricamente, não haja deficiência de N. O valor que tem sido mais utilizado como índice de suficiência de N (ISN%) é igual a 0,90. Assim, quando o percentual relativo de clorofila da amostra situar-se abaixo de 90% da leitura na faixa de referência, recomenda-se a aplicação da adubação nitrogenada (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; VARVEL et al., 1997; WASKOM et al., 1996). Portanto, se o manejo da adubação nitrogenada fosse baseado no ISN, as plantas que apresentaram o ISN maior ou igual a 90% não deveriam receber a parcela do adubo nitrogenado naquela data ou, então, receberiam uma dose menor, visando apenas manter o ISN acima de 90%, o que reduziria a dose total aplicada no ciclo e, provavelmente, evitaria o excesso de N. A utilização do ISN parece ser mais viável do que a utilização de valores críticos de

TRC, pois seria necessário determinar valores para cada espécie, cultivar, estágio fenológico e condições edafoclimáticas (PETERSON et al., 1993).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O N é um dos nutrientes que mais limita a produtividade do feijão. Sua deficiência no solo é causada pelo fato de ser o nutriente absorvido em maior quantidade e perdido no sistema solo-planta em grande quantidade (pelos processos de volatilização, lixiviação e desnitrificação). Além disso, o baixo teor de matéria orgânica no solo e a perda por erosão da camada superficial do solo também contribuem para sua deficiência. O N é responsável pelo aumento da área foliar da planta, que aumenta a eficiência de interceptação de radiação solar e a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a produtividade. O método de diagnóstico de deficiências nutricionais é composto da análise química da planta e dos sintomas visuais foliares ou de crescimento. A observação visual dos sintomas é um método qualitativo, eficiente e é o mais barato. Porém, requer grande experiência por parte do avaliador. A análise química da planta é o método mais caro de avaliação do estado nutricional. Para a interpretação dos resultados da análise da planta, é necessário o conhecimento dos níveis críticos preestabelecidos para cada nutriente e para cada cultura.

A eficiência de recuperação de N pelo feijoeiro é menor do que 50%, tanto em solo de várzea como de Cerrado. Nessa situação, o uso racional da adubação nitrogenada é fundamental, não somente para aumentar a eficiência de recuperação, mas também para aumentar a produtividade da cultura e para diminuir o custo de produção e os riscos de poluição ambiental. A eficiência de recuperação do N pode ser aumentada com a adoção de práticas de manejo apropriadas, como o uso de dose adequada e aplicação na época apropriada, de acordo com a necessidade da cultura.

A dose adequada de N é aquela que propicia uma produtividade máxima e acima da qual não há resposta da cultura que justifique aumentar a quantidade do nutriente. Por ser o N um nutriente móvel no solo e que muda de concentração com o clima, solo e tempo, as recomendações de adubação nitrogenada são feitas com base na resposta da cultura à aplicação desse nutriente em condições de campo. A necessidade de adubação nitrogenada para o feijoeiro está em torno de 120 kg de N ha<sup>-1</sup> a 140 kg de N ha<sup>-1</sup> para obter uma produtividade de cerca de 3.000 kg ha<sup>-1</sup>.

Grande parte de N deve ser aplicada no plantio (de 50% a 60%) e o restante em cobertura, aproximadamente uma semana antes da floração. Tanto o sulfato de amônio como a ureia podem ser usados como fonte de N. As vantagens da ureia, que é mais concentrada em N, são o menor custo do seu transporte e a facilidade na sua aplicação. Por outro lado, o sulfato de amônio contém aproximadamente 24% de S, o que pode evitar a deficiência de S em solos com baixo teor desse nutriente. Existem diferenças significativas entre os genótipos na absorção e utilização de nutrientes, e esse aspecto deve ser explorado no manejo de N na cultura do feijoeiro. A inoculação com rizóbio aumenta a produtividade, mas a resposta fica abaixo da obtida com a aplicação da dose adequada de N. Isso significa que o feijoeiro precisa de adubação química de N junto com a inoculação para aumentar a produtividade e reduzir a dose de N a ser aplicada.



## Capítulo 5

# Fósforo

## INTRODUÇÃO

No Brasil, país eminentemente agrícola, a agricultura é um setor que causa forte impacto na sustentabilidade ambiental e socioeconômica. Apesar dos elevados patamares de produção agrícola recentemente alcançados (em torno de 160 milhões de toneladas de grãos na safra 2010/2011), a produtividade de várias culturas encontra-se aquém do potencial genético dos materiais disponíveis. A cultura do feijoeiro se encaixa nesse paradigma e apresenta uma importância social e econômica inegável para o País. Dentre os fatores que contribuem para a baixa produtividade e a instabilidade da produção dessas culturas, destaca-se a baixa disponibilidade de fósforo (P) nos solos predominantes nas regiões tropicais. Nos solos de Cerrado e de várzeas, essa carência está associada ao teor naturalmente baixo de P e à sua alta capacidade de imobilização graças aos altos teores de alumínio (Al) e ferro (Fe) (FAGERIA, 1989, 2001a, 2001b). Carvalho et al. (1995) e Santos et al. (2011) também relataram que, entre os nutrientes, o P é aquele que frequentemente mais limita a produção das culturas nos solos da região do Cerrado. Isso ocorre pelos fatos de esse nutriente apresentar-se em formas pouco disponíveis aos vegetais e de os solos dessa região apresentarem elevada adsorção, fazendo com que a eficiência dos fertilizantes fosfatados em sistemas agrícolas seja baixa (somente de 10% a 20% do nutriente são usados pelas culturas no ano de aplicação, e o valor residual raramente excede 50%) (BOLLAND; GILKES, 1998).

No processo de modernização e racionalização da agricultura brasileira, o uso de adubação adequada constitui um fator importante para o aumento da produtividade. O custo crescente dos insumos agrícolas exige cada vez mais a adoção de métodos e técnicas de cultivo adequados à produção das culturas anuais, como a do feijoeiro. A elevação dos custos dos fertilizantes nos últimos anos é provavelmente irreversível, já que é reflexo de preços mais elevados de energia, matéria-prima e transporte. Na agricultura moderna, o custo do fertilizante para culturas anuais, em média, corresponde a aproximadamente 30% do custo total de produção (FAGERIA et al., 2004). Os fertilizantes passam, assim, a exigir maior dispêndio e merecem, portanto, atenção especial com referência ao seu uso para o melhor aproveitamento pelas culturas. Nesse contexto, o manejo adequado da adubação fosfatada é uma estratégia importante para o aumento da produtividade e a redução do custo de produção e da poluição ambiental.

## SOLUBILIDADE DOS FOSFATOS

Os termos usados para descrever os fosfatos contidos nos fertilizantes são: solúvel em água, solúvel em citrato, insolúvel em citrato, P disponível e P total. Tisdale et al. (1985) e Fageria et al. (1999) descreveram esses termos:

- Solúvel em água: uma pequena amostra do material analisado em laboratório sofre uma primeira extração com água por um determinado tempo. A solução é, então, filtrada, e a quantidade de P contida no filtrado é determinada, sendo expressa como P solúvel em água.
- Solúvel em citrato: o resíduo do filtrado da extração em água é extraído com solução de citrato de amônio 1N, sendo agitado por determinado tempo e filtrado. O teor de P no filtrado é determinado, sendo expresso como P solúvel em citrato.
- Insolúvel em citrato: o teor de P remanescente no resíduo obtido após a extração com citrato é determinado, sendo expresso como P insolúvel em citrato.
- P disponível: é a soma do P solúvel em água e do P solúvel em citrato.
- P total: é a soma do P disponível e do P insolúvel em citrato.
- P lábil: do ponto de vista da nutrição de plantas, três frações dos fosfatos do solo são importantes: P em solução do solo, P lábil e P não lábil. Existe uma relação entre essas frações que, de acordo com Olsen (1980), pode ser expressa pela seguinte equação:

$$P \text{ em solução do solo} \Leftrightarrow P \text{ lábil} \Leftrightarrow P \text{ não lábil}$$

A fração em solução representa o P disponível para as plantas que se encontra na solução do solo; a fração lábil representa o P adsorvido na fase sólida do solo e em equilíbrio com o P da solução; a fração não lábil representa o P insolúvel, que pode ser liberado muito lentamente para a fração lábil. A capacidade-tampão do P do solo é a quantidade total de íons disponíveis (fração solúvel + fração lábil), por unidade de volume de solo, necessária para aumentar a concentração da solução em uma unidade. A capacidade-tampão do P do solo também tem sido definida como a relação entre a concentração de íons adsorvidos na fase sólida e a concentração de íons em solução (FAGERIA et al., 1999).



## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O ciclo de P no sistema solo-planta envolve vários processos como: absorção, solubilização, mineralização, imobilização (adsorção e precipitação), lixiviação e erosão (Figura 1). Todos esses processos são influenciados pelo solo, pelo clima, pela planta e pelas interações entre eles. Portanto, o ciclo de P no sistema solo-planta é muito dinâmico e complexo e, para que funcione eficientemente, é essencial que seu ambiente esteja em um nível ótimo. A maior parte de P aplicado no solo é absorvida pela planta e imobilizada no sistema solo-planta. Ainda, as perdas pela erosão do solo são consideradas substanciais (RECHEIGL et al., 1992).

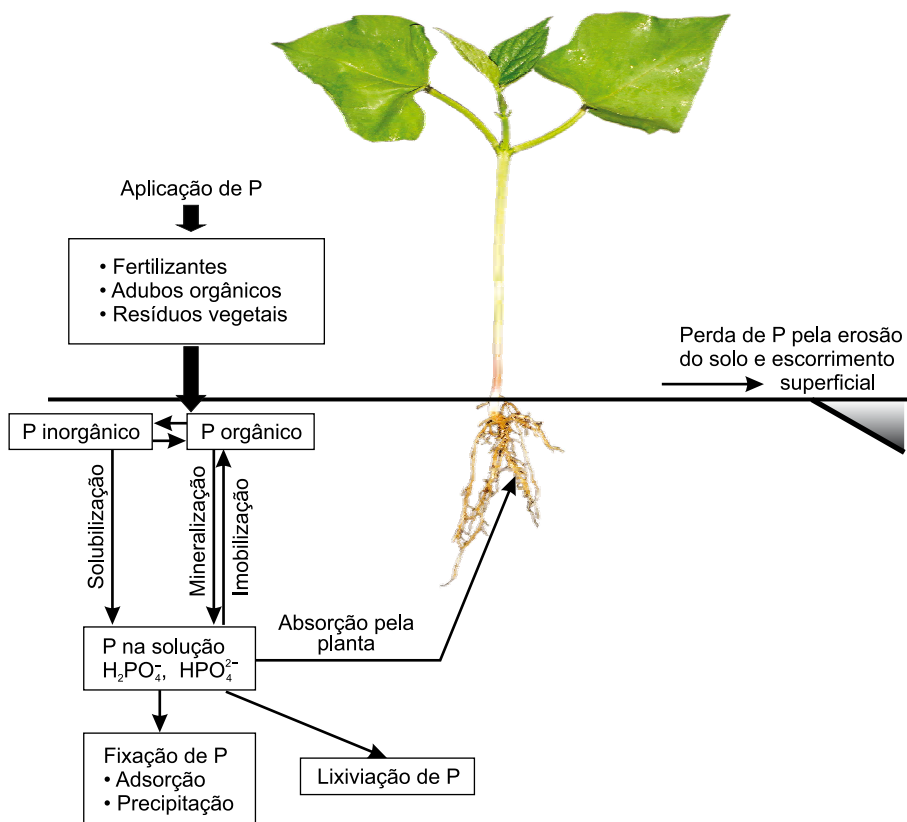


**Figura 1.** Ciclo do fósforo (P) no sistema solo-planta.

Ilustração: Sebastião Araújo.

Entre as propriedades químicas do solo, o pH é a que mais influencia a disponibilidade de P para as plantas. Níveis de pH tanto baixo como alto prejudicam a disponibilidade de nutrientes para as culturas. A maior disponibilidade de P está na faixa de pH de 6,0 a 6,8 (FAGERIA et al., 1999). A resposta do feijoeiro ao pH do solo é ilustrada na Figura 2. Da mesma maneira que para a parte aérea, o pH fez aumentar a massa da matéria seca radicular do feijoeiro até certo nível. A resposta do crescimento radicular ao pH em solo de várzea é apresentada na Figura 3.

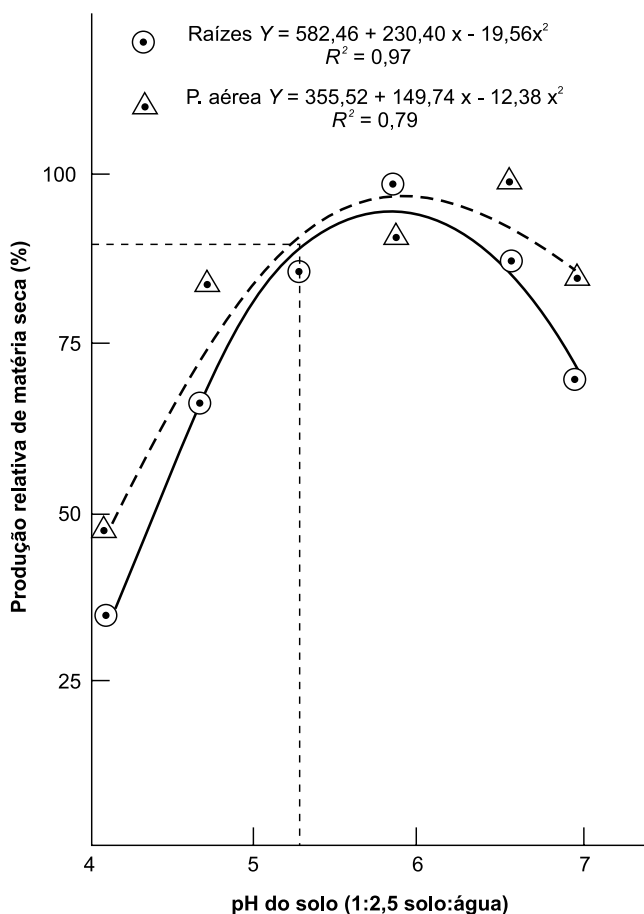


**Figura 2.** Relação entre o pH do solo e a produção relativa de matéria seca das raízes e da parte aérea do feijoeiro em um Oxissolo do Brasil Central.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1999).

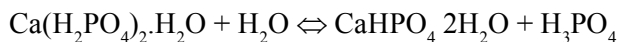
Foto: Sebastião Araújo



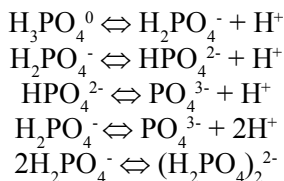
**Figura 3.** Influência do pH no crescimento do sistema radicular do feijoeiro em solo de várzea: pH 4,9 (A); pH 5,9 (B); pH 6,4 (C); pH 6,7 (D); pH 7,0 (E).

Fonte: Fageria et al. (1996).

O P é absorvido pelas plantas principalmente nas formas iônicas de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , que variam no solo de acordo com o pH. A aplicação no solo de fertilizantes fosfatados, como os superfosfatos simples ou triplo, causa a seguinte reação:

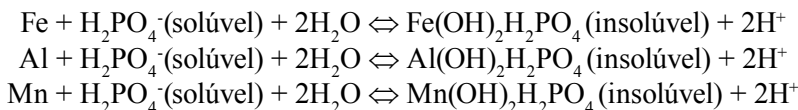


Na solução diluída, o ácido fosfórico é dissociado da seguinte maneira (LINDSAY, 1979):

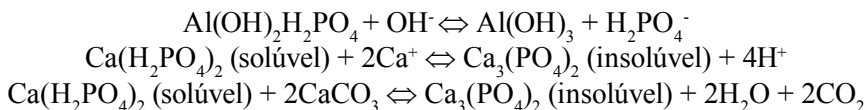


Na faixa de pH entre 5 e 8, que ocorre na maioria dos solos, os íons de P não dissociados ( $\text{H}_3\text{PO}_4^0$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ) são praticamente iguais a zero. Portanto, todo o P naturalmente absorvido pelas plantas está na forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Sob pH 6, aproximadamente 94% do P está na forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ; a porcentagem cai para 60% em solo com pH 7 (STEVENSON, 1986). De maneira geral, a taxa de absorção do ânion monovalente ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) é maior do que a do bivalente ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ). Quando aumenta o pH, a absorção de P é inibida pelo íon  $\text{OH}^-$  e muda a taxa de absorção pela mudança na forma iônica.

Quando íons de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  são formados no solo, a fixação pode ocorrer das seguintes formas:



A aplicação de calcário até certo nível de pH aumenta a disponibilidade de P e depois a diminui (FAGERIA, 1989). Sob baixo pH (< 5,5), aumenta a disponibilidade de P com a aplicação de calcário e, sob alto pH (> 7,0), ocorre a fixação de P, explicada pelas seguintes equações:



A fixação do P depende da quantidade e do tipo de argila ou mineralogia. Comparando solos com mesmo pH e mineralogia, a fixação do P será maior naquele com maior teor de argila. Considerando que a matéria orgânica geralmente tem baixa capacidade de fixação de P, solos com alto teor de matéria orgânica ativa têm baixa capacidade de fixação de P (FAGERIA et al., 1999).

A aplicação de P como fertilizante é essencial para aumentar a produtividade das culturas em solos de Cerrado e várzeas do Brasil. Nas Figuras 4 e 5, pode-se observar a fixação de P em um Oxisolo do Brasil

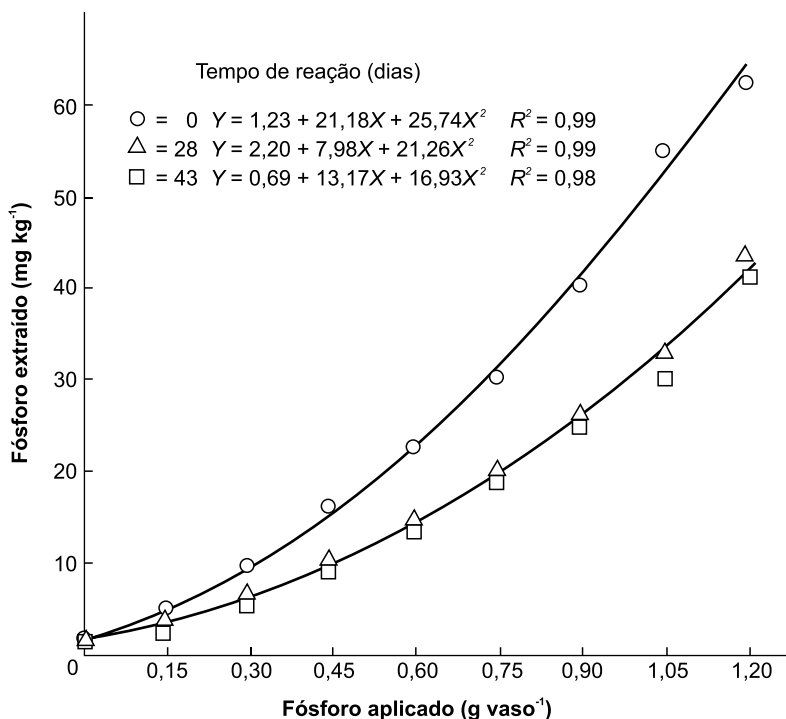


**Figura 4.** Relação entre fósforo (P) aplicado e P extraído pelo extrator Mehlich 1 em um Oxissolo do Brasil Central.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1999).

Central. O teor de P extraído aumentou com a elevação do nível de P. O aumento foi lento em solos com baixos níveis de P, mas significativamente mais rápido em solos com altos níveis de P. De acordo com Fageria e Barbosa Filho (1987), a capacidade de fixação de P em um Oxissolo do Cerrado variou de 77% a 90%, dependendo da quantidade de P solúvel aplicado. A alta capacidade de fixação de P nesse solo relacionou-se com baixo pH, alto teor de óxido de Fe e alta saturação de Al (SMYTH; SANCHEZ, 1982).

## FUNÇÕES E SINTOMAS DE DEFICIÊNCIAS

O P é um nutriente essencial para o crescimento e a reprodução das plantas, cujas funções não podem ser executadas por nenhum outro

nutriente. Sem um nível adequado de P no solo, a planta não pode alcançar seu potencial máximo de produtividade. O P aumenta a massa da matéria seca da parte aérea, o número de vagens e a massa de 100 grãos e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (Tabela 1).

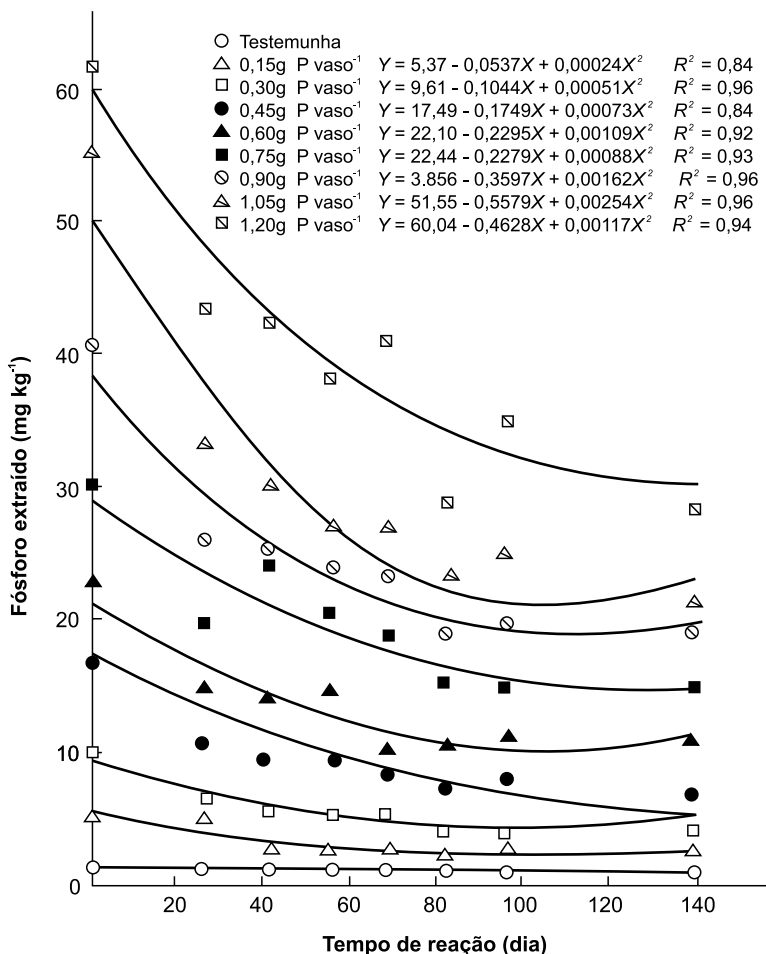


**Figura 5.** Relação entre o tempo de reação e o fósforo (P) extraído pelo extrator Mehlich 1 com diferentes níveis de P em um Oxissolo do Brasil Central.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1999).

**Tabela 1.** Produção e seus componentes influenciados pela adubação fosfatada em solo de Cerrado.

| Dose de P<br>(mg kg <sup>-1</sup> )                                                                                | Massa de matéria seca<br>da parte aérea (MSPA)<br>(g vaso <sup>-1</sup> ) | Produção<br>de grãos<br>(g vaso <sup>-1</sup> ) | Vagens<br>(nº vaso <sup>-1</sup> ) | Massa de<br>100 grãos<br>(g) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| 0                                                                                                                  | 8,0                                                                       | 10,0                                            | 11,3                               | 26,6                         |
| 50                                                                                                                 | 20,7                                                                      | 25,6                                            | 29,0                               | 28,0                         |
| 100                                                                                                                | 34,0                                                                      | 30,6                                            | 32,7                               | 28,2                         |
| 150                                                                                                                | 30,4                                                                      | 34,3                                            | 39,0                               | 29,6                         |
| 200                                                                                                                | 34,4                                                                      | 28,4                                            | 32,0                               | 30,5                         |
| 250                                                                                                                | 38,0                                                                      | 30,0                                            | 32,0                               | 29,1                         |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                        |                                                                           |                                                 |                                    |                              |
| Dose de P (X) vs. MSPA (Y) = 9,2762 + 0,2547 X – 0,00059 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,7025**                |                                                                           |                                                 |                                    |                              |
| Dose de P (X) vs. Produção de grãos (Y) = 11,7309 + 0,2666 X – 0,00081 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,7631**  |                                                                           |                                                 |                                    |                              |
| Dose de P (X) vs. Número de vagens (Y) = 13,0595 + 0,3017 X – 0,00094 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,7632**   |                                                                           |                                                 |                                    |                              |
| Dose de P (X) vs. Massa de 100 grãos (Y) = 26,466 + 0,0325 X – 0,000081 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,6835** |                                                                           |                                                 |                                    |                              |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2004).

As funções importantes que esse nutriente desempenha na planta são: aumenta o número de vagens, aumenta a massa dos grãos, ajuda no processo de maturação dos grãos, incrementa o crescimento do sistema radicular e melhora a qualidade dos grãos. O P também atua como agente de transferência de energia dentro da planta, pois integra o mais importante composto de energia, que é o trifosfato de adenosina (ATP). Além disso, o P é essencial para a estrutura de trifosfopiridina nucleotídeo (TPN), que funciona como carregador de elétrons ou hidrogênio (H) entre os sítios de reações de oxidação e redução, que ocorrem na respiração, fermentação e fotossíntese. Por fim, o P é importante na formação das células e está relacionado com a fixação de N<sub>2</sub> em leguminosas.

O melhor parâmetro de avaliação da deficiência de um nutriente em um determinado solo é a resposta da cultura à sua aplicação. Com base

nesse critério, pode-se dizer que os solos ácidos e alcalinos, em várias partes do mundo, são extremamente deficientes em P para a produção das culturas (FAGERIA et al., 1999). Na maioria dos solos brasileiros, tanto de Cerrado como de várzeas, o P é o nutriente mais deficiente, sendo sua aplicação como fertilizante fator indispensável para a produção adequada de feijão.

Quando o teor de um determinado nutriente não é suficiente no meio de crescimento, aparecem alguns sintomas de deficiência, os quais podem estar relacionados com a redução da altura, dos ramos e do crescimento das raízes e com a descoloração de folhas. A observação dos sintomas visuais é a técnica mais barata para diagnosticar desordens nutricionais. Entretanto, é necessário que o observador tenha muita experiência prática, porque os sintomas de deficiência nutricional podem ser confundidos com outros problemas, tais como deficiência hídrica, ocorrência de doenças e de pragas, compactação do solo, efeito residual de herbicidas, salinidade do solo e drenagem deficiente. Os sintomas de deficiência de um dado nutriente normalmente ocorrem na área toda e não em plantas isoladas.

O P, assim como o N, é um elemento móvel na planta; sua deficiência aparece primeiramente nas folhas velhas e causa o prolongamento do ciclo da cultura. As folhas mais velhas apresentam coloração bronze, principalmente na margem. O sintoma progride da ponta para a base, e as folhas novas adquirem uma coloração verde-escura. Além disso, a deficiência de P reduz o crescimento, leva a planta a ficar pequena, com coloração verde-escura, tornando-se alaranjada quando a deficiência é mais acentuada. O P promove o desenvolvimento do sistema radicular (Figura 6). O crescimento das plantas de feijão cultivadas em solo de Cerrado com e sem deficiência de P é ilustrado na Figura 7. Nas Figuras 8 e 9, podem ser observadas plantas com e sem sintomas de deficiência de P.

Uma desvantagem desse método (observação visual dos sintomas) é que, às vezes, a deficiência nutricional não pode ser corrigida no mesmo ciclo da cultura, se a identificação tiver ocorrido tardiamente ou por causa da imobilidade do nutriente no solo (GRUNDON, 1987). Existem várias publicações com fotografias coloridas que permitem identificar as deficiências nutricionais em diversas culturas, inclusive no feijoeiro, pelos sintomas visuais (FAGERIA et al., 1996; GRUNDON, 1987; WALLACE, 1961; WILCOX; FAGERIA, 1976).



Foto: Sebastião Araújo

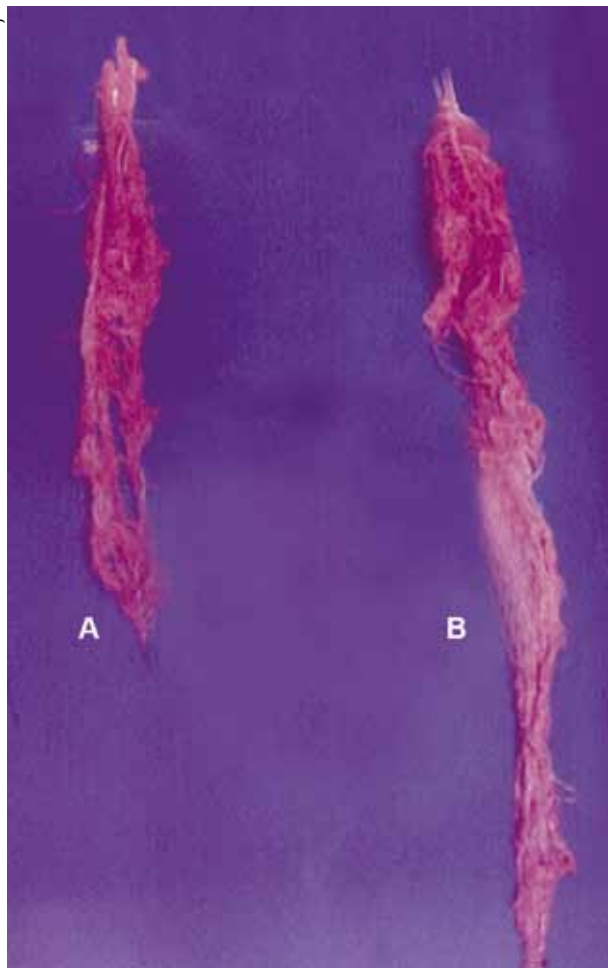


**Figura 6.** Influência do fósforo (P) no desenvolvimento do sistema radicular do feijoeiro: sem P (A) e com 50 ppm de P (B).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 7.** Crescimento das plantas de feijoeiro com 25 mg de P kg<sup>-1</sup> do solo (A) e 200 mg de P kg<sup>-1</sup> do solo (B).

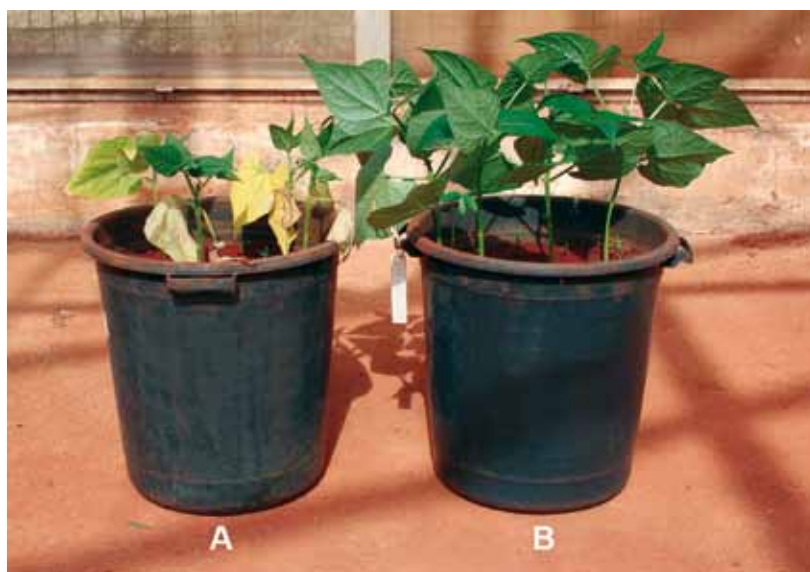


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 8.** Plantas de feijoeiro com deficiência de fósforo (P) (25 mg de P kg<sup>-1</sup> do solo) (A) e sem deficiência de P (200 mg de P kg<sup>-1</sup> do solo) (B).

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 9.** Plantas de feijoeiro deficientes (esquerda) e não deficientes (direita) em fósforo (P).

## TEOR E ACUMULAÇÃO NA PLANTA

O teor de um dado nutriente na planta é usado como índice de diagnóstico de deficiência ou suficiência na planta; a acumulação de um dado nutriente é utilizada como parâmetro de extração daquele nutriente do solo, indicando a redução da fertilidade do solo (FAGERIA, 2005, 2007). Além disso, a acumulação de um determinado nutriente serve como indicador da quantidade absorvida durante os estádios de crescimento da cultura. Os dados de teor e acumulação de nutrientes são usados para embasar a correção de deficiências nutricionais e a manutenção da fertilidade do solo no nível desejável.

Nas Figuras 10 e 11, são apresentados dados de teor e acumulação de P, respectivamente, durante o ciclo da cultura do feijoeiro. O teor de P diminuiu até 40 dias após a semeadura, ficou estável ou teve pequeno aumento no período de 40 a 63 dias após a semeadura e depois sofreu uma diminuição linear até a maturação fisiológica da planta. Isso significa que o teor desse nutriente nas plantas mudou significativamente com o avanço da idade e que sua mensuração em certa idade da planta não pode servir como referência do teor em outra idade. A diminuição do teor de P está relacionada com o aumento da matéria seca da parte aérea

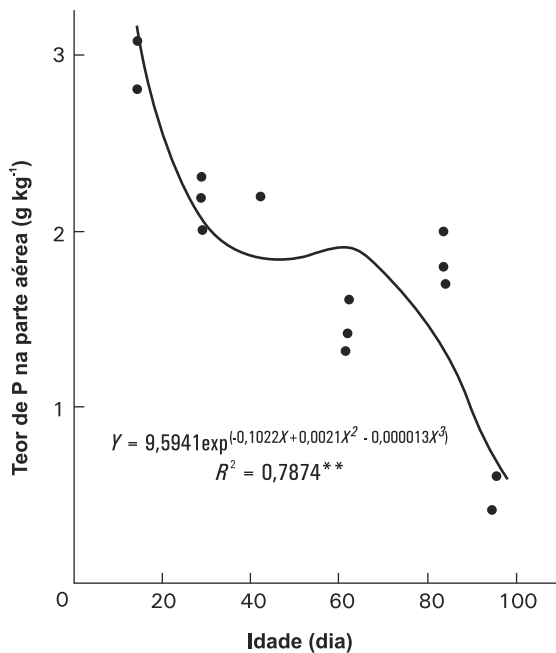


**Figura 10.** Teor de fósforo (P) na parte aérea do feijoeiro em função da idade da planta.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

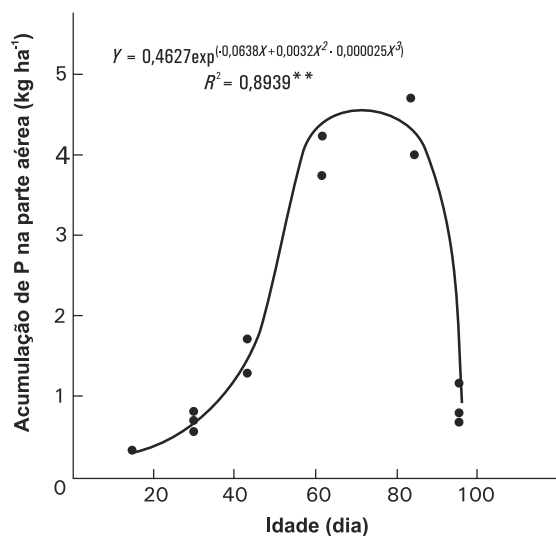


**Figura 11.** Acumulação de fósforo (P) na parte aérea do feijoeiro em função da idade da planta.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

e é chamada “efeito de diluição” na nutrição de plantas. Os dados dos teores de P apresentados na Figura 10 servem como referência de teores adequados desse nutriente em diferentes estádios de crescimento do feijoeiro em solo de Cerrado.

A acumulação de P nessa cultura aumentou até 65 dias de idade, ficou mais ou menos estável no período de 65 a 80 dias e depois diminuiu. O aumento da acumulação de P com o aumento da idade da planta está associado ao aumento da matéria seca da parte aérea da planta (FAGERIA et al., 2004). A diminuição da acumulação de P após 80 dias de idade está relacionada com a translocação de P para os grãos.

O teor e a acumulação de P nos grãos de feijão estão correlacionados significativamente com a produção de grãos (Tabela 2); porém, quando se considera a parte aérea sem os grãos, somente a acumulação de P está significativamente associada com a produção de grãos. Isso significa que, com a adoção de práticas apropriadas de manejo de P no solo e o uso de genótipos eficientes, é possível aumentar o teor e a acumulação de P nos grãos e, conseqüentemente, a produtividade do feijoeiro.

**Tabela 2.** Relação entre produção de grãos e teor e acumulação de fósforo (P) na parte aérea e nos grãos de feijão.

| Parâmetro de absorção de P                                   | Equação de regressão                     | R <sup>2</sup>       |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------|
| Teor de P na parte aérea (X) vs. Produção de grãos (Y)       | $Y = 28,7329 - 7,4912 X + 4,9642 X^2$    | 0,0114 <sup>ns</sup> |
| Teor de P nos grãos (X) vs. Produção de grãos (Y)            | $Y = -140,8766 + 79,6258 X - 9,0072 X^2$ | 0,7819**             |
| Acumulação de P na parte aérea (X) vs. Produção de grãos (Y) | $Y = 8,2754 + 1,4364 X - 0,01909 X^2$    | 0,5788**             |
| Acumulação de P nos grãos (X) vs. Produção de grãos (Y)      | $Y = 5,8842 + 0,2890 X - 0,00074 X^2$    | 0,7458**             |

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria et al. (2004).

## EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO

Na Tabela 3, são apresentados os resultados da eficiência de uso de P em várias culturas, inclusive no feijoeiro. A eficiência de uso de P

**Tabela 3.** Eficiência de uso de fósforo (P) por culturas anuais.

| <b>Cultura</b>               | <b>Produtividade<br/>(kg ha<sup>-1</sup>)</b> | <b>Acumulação de P<br/>(kg)</b> | <b>EUP<sup>(1)</sup><br/>(kg kg<sup>-1</sup>)</b> |
|------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Arroz de terras altas</b> |                                               |                                 |                                                   |
| Parte aérea                  | 6.104                                         | 2,9                             | 2.105                                             |
| Grãos                        | 4.413                                         | 9,5                             | 465                                               |
| <b>Milho</b>                 |                                               |                                 |                                                   |
| Parte aérea                  | 11.006                                        | 4,5                             | 2.446                                             |
| Grãos                        | 8.221                                         | 16,7                            | 492                                               |
| <b>Feijão</b>                |                                               |                                 |                                                   |
| Parte aérea                  | 1.807                                         | 2,3                             | 786                                               |
| Grãos                        | 3.182                                         | 13,9                            | 229                                               |
| <b>Soja</b>                  |                                               |                                 |                                                   |
| Parte aérea                  | 3.518                                         | 1,8                             | 1.954                                             |
| Grãos                        | 4.003                                         | 12,3                            | 280                                               |

<sup>(1)</sup> *Eficiência de uso de fósforo = Produtividade de parte aérea ou grãos/P acumulado em parte aérea ou grãos.*

Fonte: Fageria et al. (2006b).

foi maior em cereais do que em leguminosas. A alta eficiência de uso de P em cereais está associada com alta produtividade. A baixa produtividade de leguminosas está associada com sua alta taxa de respiração em comparação com a dos cereais (FAGERIA et al., 2006b). Na Tabela 4, são apresentados os resultados de eficiência de recuperação de P para feijão sob diferentes doses desse nutriente aplicadas em solo de Cerrado. A eficiência de recuperação é influenciada significativamente pela aplicação de P e diminui com o aumento das doses do nutriente na faixa de 50 mg de P kg<sup>-1</sup> a 250 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo. Na dose de 50 mg de P kg<sup>-1</sup>, 11,1% de P foram recuperados pelas plantas de feijoeiro; com a aplicação de 250 mg de P kg<sup>-1</sup>, somente 5,7% de P foram recuperados. Em média, 7,7% de P foram recuperados pelas plantas de feijoeiro. A baixa eficiência de recuperação desse nutriente está relacionada com a alta capacidade de fixação de P desses solos. Santos et al. (2011) também relataram que os maiores valores de eficiência de absorção de P foram observados para as

**Tabela 4.** Eficiência de recuperação de fósforo (P) determinada após a colheita de feijão em solo de Cerrado.

| Dose de P (mg kg <sup>-1</sup> )                                                                           | Eficiência de recuperação (%) <sup>(1)</sup> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 50                                                                                                         | 11,1                                         |
| 100                                                                                                        | 7,8                                          |
| 150                                                                                                        | 7,4                                          |
| 200                                                                                                        | 6,4                                          |
| 250                                                                                                        | 5,7                                          |
| Média                                                                                                      | 7,7                                          |
| Dose de P (X) vs. Eficiência (Y) = 13,5933 – 0,0628 X + 0,000127 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,796** |                                              |

<sup>(1)</sup> *Eficiência de recuperação = (Acumulação de P na parte aérea + grãos com P - Acumulação de P na parte aérea + grãos sem P/Quantidade de P aplicado) x 100.*

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2004).

menores doses de P, havendo diminuição da eficiência de absorção com o aumento das doses, principalmente nos solos já cultivados, fatos que devem estar relacionados tanto ao fornecimento de fertilizantes fosfatados quanto a uma maior predominância de P na forma orgânica lábil. Baligar et al. (2001) relataram que a eficiência de recuperação de N é menor do que 50%, a de P é menor do que 10% e a de potássio (K) é menor do que 40% nas culturas anuais.

## ÍNDICE DE COLHEITA DE GRÃOS E DE FÓSFORO

O índice de colheita de grãos e o índice de colheita de P são importantes parâmetros na determinação da produtividade das culturas (FAGERIA, 2009; FAGERIA; SANTOS, 2008a). Com o aumento desses parâmetros, aumenta a produtividade do feijoeiro de maneira linear ou quadrática, dependendo da cultivar (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2006a). Esses dois índices podem ser aumentados com o manejo das culturas. Os índices de colheita de grãos e de P de duas leguminosas e dois cereais são apresentados na Tabela 5. Esses índices são maiores para as leguminosas em comparação com os cereais.

**Tabela 5.** Índice de colheita de grãos e de colheita de fósforo (P) em quatro culturas.

| Cultura               | ICG <sup>(1)</sup> | ICP <sup>(2)</sup> |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Arroz de terras altas | 0,42               | 0,77               |
| Milho                 | 0,43               | 0,79               |
| Feijão                | 0,64               | 0,86               |
| Soja                  | 0,53               | 0,89               |

<sup>(1)</sup> Índice de colheita de grãos =  $\frac{\text{Produtividade de grãos}}{\text{Produtividade de grãos} + \text{Massa da matéria seca da parte aérea}}$ .

<sup>(2)</sup> Índice de colheita de P =  $\frac{\text{Acumulação de P nos grãos}}{\text{Acumulação de P nos grãos e na parte aérea}}$ .

Fonte: Fageria (2009).

## INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

Nos últimos anos, uma área que tem sido bastante pesquisada em fertilidade do solo é a inter-relação dos nutrientes na rizosfera (FAGERIA, 2009). O conhecimento dos processos que ocorrem nessa região pode melhorar o entendimento da relação entre produtividade e níveis de nutrientes no solo (OHNO; GRUNES, 1985). O uso balanceado de nutrientes aumenta a produtividade e a eficiência de seu uso. Altas doses de N provocam a necessidade de altas doses de K e P para se obter respostas à adubação e alta produtividade nas principais culturas anuais. Os resultados na Tabela 6 mostram que o aumento simultâneo de doses de N e P aumenta a produtividade do feijoeiro. Isso significa que há interação sinérgica entre N e P na produção do feijoeiro.

**Tabela 6.** Interação entre nitrogênio (N) e fósforo (P) na produtividade do feijoeiro em solo de várzea.

| Dose de N (kg ha <sup>-1</sup> ) | Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> ) |                                                         |                                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                  | Sem P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>             | 30 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> | 80 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> |
| 0                                | 2.105                                         | 1.870                                                   | 1.707                                                   |
| 45                               | 2.630                                         | 3.048                                                   | 2.660                                                   |
| 90                               | 2.563                                         | 2.804                                                   | 3.116                                                   |
| 135                              | 2.280                                         | 2.562                                                   | 2.742                                                   |

Fonte: Fageria et al. (2006a).



## ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO

A estratégia do manejo de P para aumentar sua eficiência de uso inclui práticas associadas ao manejo do solo e das plantas.

### Análise do solo

As recomendações de adubação com nutrientes imóveis no solo, como o P, são feitas com base na análise de solo. Para transformação da análise de solo em recomendações de adubação, é necessário determinar uma relação entre o teor do nutriente no solo e a produtividade da cultura. Esse processo é chamado de teste de calibração de análise do solo (FAGERIA, 1989). Observa-se, na Figura 12, a relação entre o teor de P no solo e a produção relativa de grãos de feijão em solo de várzea. A relação foi quadrática, com ponto máximo em 9,6 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo. Com base nessa relação, estabeleceram-se quatro classes de teor de P no solo, de acordo com Raij (1991): muito baixo (até 70% da produção relativa); baixo (de 70% a 90% da produção relativa); médio (de 90% a 100% da produção relativa); e alto (100% da produção relativa). A classificação do teor de P, a sua interpretação e as recomendações de adubação são apresentadas na Tabela 7.

Na Tabela 8, são apresentadas as recomendações de adubação fosfatada para a cultura do feijoeiro de acordo com a análise de solo para os

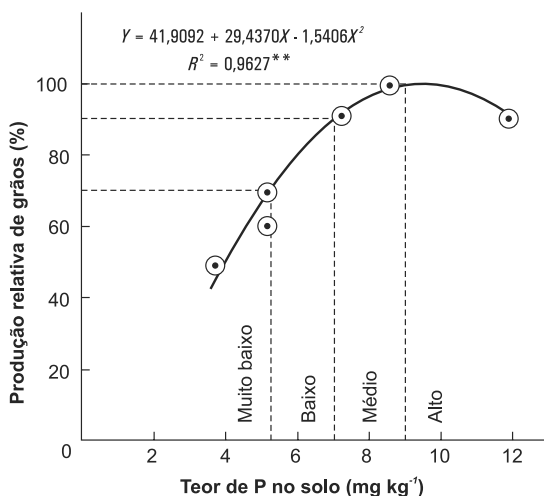


**Figura 12.** Relação entre teor de fósforo (P) no solo e produção relativa de grãos de feijão.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

**Tabela 7.** Interpretação dos teores de fósforo (P) extraídos por extrator Mehlich 1 e recomendações de adubação fosfatada para a cultura do feijoeiro em solo de várzea.

| Teor de P no solo<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Interpretação da<br>análise do solo | Produção<br>relativa (%) | Recomendação de adubação<br>(kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 0–5,3                                       | Muito baixo                         | 0–70                     | 150                                                                                 |
| 5,3–7,1                                     | Baixo                               | 70–90                    | 100                                                                                 |
| 7,1–9,0                                     | Médio                               | 90–100                   | 100                                                                                 |
| > 9,0                                       | Alto                                | 100                      | 50                                                                                  |

Fonte: Fageria e Santos (1998).

**Tabela 8.** Interpretação dos teores de fósforo (P) extraídos pelo extrator Mehlich 1 e recomendações de adubação fosfatada em alguns estados brasileiros.

| Teor de P no solo   | Interpretação da análise do solo | Recomendação<br>(kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> ) |
|---------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Goiás</b>        |                                  |                                                                         |
| 0–5,0               | Muito baixo                      | 90–120                                                                  |
| 5,1–10,0            | Baixo                            | 70–90                                                                   |
| 10,1–14,0           | Médio                            | 60–70                                                                   |
| > 14,0              | Alto                             | 50–70                                                                   |
| <b>São Paulo</b>    |                                  |                                                                         |
| 0–6                 | Muito baixo                      | 80                                                                      |
| 7–15                | Baixo                            | 60                                                                      |
| 16–40               | Médio                            | 40                                                                      |
| > 40                | Alto                             | 20                                                                      |
| <b>Minas Gerais</b> |                                  |                                                                         |
| 0–6,6               | Muito baixo                      | 110                                                                     |
| 6,7–12,0            | Baixo                            | 90                                                                      |
| 12,1–20,0           | Médio                            | 70                                                                      |
| > 20                | Alto                             | 50                                                                      |

Fonte: Bulisani (1985), Comissão de Fertilidade de Solos de Goiás (1988), Ribeiro et al. (1999) e Rosolem (1996).

estados de Goiás, São Paulo e Minas Gerais. Na Tabela 9, é apresentada a classificação de análise de solo com relação ao teor de P para os estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Bahia e Pernambuco, que variou dependendo do tipo de solo, da cultivar, da disponibilidade de água e das condições socioeconômicas dos produtores.

Em trabalho que determinou a relação entre o P extraído do solo e a produtividade relativa de grãos em solo de Cerrado, Fageria et al. (1999) constataram que 90% de produtividade foram obtidos com o nível crítico de 6,3 mg de P kg<sup>-1</sup> do solo (Figura 13).

**Tabela 9.** Interpretação dos teores de fósforo (P) extraídos por extrator Mehlich 1 em alguns estados brasileiros.

| Estado                             | Teor de P no solo (mg kg <sup>-1</sup> ) e sua interpretação |       |      |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|------|
|                                    | Baixo                                                        | Médio | Alto |
| Rio Grande do Sul e Santa Catarina | 4–9                                                          | 9–14  | > 14 |
| Paraná                             | < 2                                                          | 2–5   | 5–13 |
| Bahia                              | < 10                                                         | 10–20 | > 20 |
| Pernambuco                         | < 3                                                          | 3–7   | 7–10 |

Fonte: Moraes (1988) e Rosolem (1996).

## Fontes de fósforo

Em razão do alto custo dos fertilizantes, é importante usar uma fonte apropriada. Como o P é imóvel no solo, é necessário que a fonte seja solúvel em água para aumentar sua eficiência agrônômica, principalmente para as culturas anuais. Existem várias opiniões sobre a proporção necessária de P solúvel em água em fertilizantes comerciais.

A Comunidade Econômica Europeia (EUROPEAN ECONOMIC COMMUNITY, 1976) exige que 93% do P disponível em fertilizantes comerciais sejam solúveis em água. Contudo, em alguns trabalhos de pesquisa, verifica-se que não existe diferença significativa na produtividade quando são utilizados fertilizantes com mais de 80% de P disponível solúvel em água (MULLINS, 1988; MULLINS; SIKORA, 1990). Ao testarem cinco fontes de fosfatos, representando os principais fosfatos naturais empregados nos Estados Unidos, Bartos et al. (1992), usando sorgo como

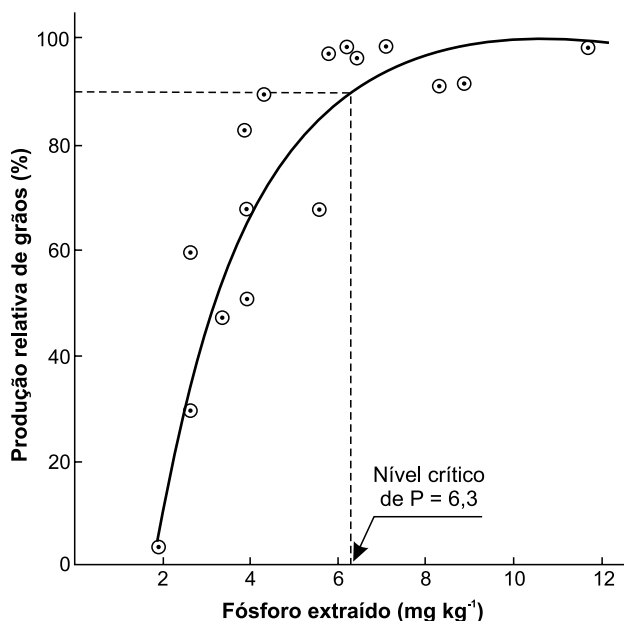


**Figura 13.** Relação entre fósforo (P) extraído pelo extrator Mehlich 1 e produção relativa de grãos do feijão em solo de Cerrado.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1999).

cultura-teste, concluíram que há necessidade de 57% a 68% de P solúvel em água para se obter 90% da produtividade máxima.

A aplicação de fosfatos naturais foi testada em vários países em desenvolvimento para reduzir o custo de produção (CHIEN; HAMMOND, 1989). Alguns fosfatos naturais, entretanto, não são apropriados para aplicação direta graças à sua baixa reatividade química no solo (HAMMOND et al., 1986; KHASAWNEH; DOLL, 1978). Os fosfatos naturais com baixa solubilidade podem tornar-se mais efetivos depois de modificados pelos processos térmicos ou pela acidulação parcial. Os fosfatos parcialmente acidulados são preparados com o tratamento do fosfato de rocha com menos ácido do que seria necessário para converter todo o conteúdo de P da rocha em superfosfatos. Está provado que alguns fosfatos parcialmente acidulados são agrônomicamente e economicamente efetivos na produção das culturas (CHIEN; HAMMOND, 1989; FAGERIA; BARBOSA FILHO, 1992; MENON et al., 1991). Na Tabela 10, são apresentadas várias fontes de P.

**Tabela 10.** Principais fertilizantes fosfatados e algumas de suas propriedades.

| Fertilizante                                                         | Teor de $P_2O_5$ (%) | Solubilidade em água (%) |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ )                                        | 55                   | 100                      |
| Fosfato diamônico $[(NH_4)_2HPO_4]$                                  | 53                   | 100                      |
| Superfosfato simples $[Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O, CaSO_4 \cdot H_2O]$ | 20                   | 85                       |
| Superfosfato triplo $[Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O]$                     | 45                   | 87                       |
| Fosfato bicálcico $[CaHPO_4, CaHPO_4 \cdot 2H_2O]$                   | 40                   | 4                        |
| Metafosfato de cálcio $[Ca(PO_3)_2]$                                 | 48                   | 4                        |
| Fosfato monoamônico $[NH_4H_2PO_4]$                                  | 18                   | 100                      |
| Termofosfato $[3MgO \cdot CaO \cdot P_2O_5 + 3(CaO \cdot SiO_2)]$    | 17–18                | Insolúvel                |
| Fosfatos naturais (Apatitas)                                         | 24–40                | Insolúvel                |

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

## Métodos de aplicação

O método de aplicação de P é muito importante para aumentar sua eficiência nutricional, principalmente em solos com baixo teor desse nutriente e que possuam alta capacidade de fixação. O fosfato aplicado no solo move-se muito pouco através do processo de difusão. Barber (1995) relatou que os valores para a taxa de difusão de P no solo estão na faixa de  $10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  a  $10^{-10} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Os métodos mais comuns são aplicação de P a lanço e em sulcos. Em condições de baixo teor de P, em solos com alta capacidade de fixação, a aplicação nos sulcos é mais efetiva (FOX; KANG, 1978; MCCONNELL et al., 1986). Conforme relatado por Peterson et al. (1981), na cultura de trigo, a aplicação de P em sulcos, em solos com baixo teor desse nutriente, foi de três a quatro vezes mais efetiva do que a aplicação a lanço. Em estudos de solos com teor de médio a alto de P, não houve diferença entre os dois métodos de aplicação (FOX et al., 1986; FOX; KANG, 1978; WELCH et al., 1966).

McConnell et al. (1986), ao estudarem os efeitos da aplicação de P em profundidade na produção de trigo, concluíram que a aplicação entre 10 cm e 12 cm de profundidade resultou em máxima produtividade.

De acordo com Smyth e Cravo (1990), a aplicação de P em sulcos, em um Oxissolo da Amazônia brasileira, resultou em máxima produtividade de milho e de feijão-caupi em comparação com a aplicação a lanço.

Em solos ácidos, como os de Cerrado, a quantidade de P necessária para a aplicação em sulcos é, em geral, de duas e meia a três vezes menor do que para a aplicação a lanço.

### **Calagem em solos ácidos**

A calagem, prática importante para aumentar a produtividade das culturas em solos ácidos, faz aumentar o pH do solo, que é uma propriedade muito importante pois controla a disponibilidade dos nutrientes. Níveis de pH tanto baixo como alto prejudicam a disponibilidade de nutrientes para as culturas. O pH 7,0 é considerado neutro; acima desse valor, o pH é alcalino e, abaixo, ácido. O pH da maioria dos solos agricultáveis situa-se na faixa de 4,0 a 9,0 (FAGERIA et al., 1990). A disponibilidade de P varia de acordo com o pH do solo (FAGERIA et al., 1999). Para a maioria das culturas, o pH adequado do solo situa-se em torno de 6,0 a 6,5, tanto no Cerrado como em solos de várzea. O aumento linear do P com o aumento do pH na faixa de 5,3 a 7,0, na média de duas profundidades do solo, é ilustrado na Figura 14.

### **Umidade do solo**

A estimativa de produtividade de várias culturas é correlacionada com a água disponível no solo (CHOPART; VAUCLIN, 1990).

A água exerce um papel importante nos processos de difusão e fluxo massal de nutrientes e, conseqüentemente, em sua absorção. Além disso, é importante no processo de translocação de nutrientes dentro da planta e, portanto, no seu metabolismo. Olsen et al. (1965) observaram uma diminuição de oito vezes na difusão de P na água, o que corresponde a uma diminuição de duas vezes na umidade do solo.

### **Efeito residual do fósforo**

O P é um nutriente imóvel no solo e dificilmente é perdido por lixiviação. Assim, o efeito residual tem um importante papel no manejo desse nutriente. Aquino e Hanson (1984) definiram o efeito residual do P como a quantidade desse nutriente disponível para a cultura sucessiva ou

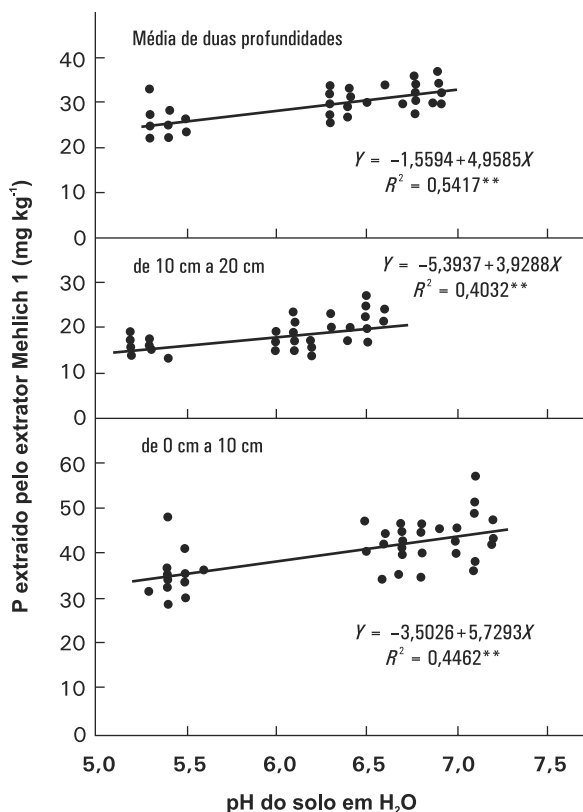


**Figura 14.** Relação entre pH do solo e fósforo (P) extraído pelo extrator Mehlich 1 em solo de Cerrado.

**\*\*** Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2008a).

a resposta dessa cultura ao nível de P anteriormente aplicado. O efeito residual depende do solo, da quantidade de P aplicada e da produtividade da cultura.

Kamprath (1967) obteve efeito residual positivo para a cultura de milho, durante 7 a 9 anos após aplicação de P a lanço em grande quantidade. Alessi e Power (1980) observaram que o efeito residual de 160 kg de P ha<sup>-1</sup>, aplicados a lanço 6 anos antes, resultou em aumento da produção de trigo de cerca de 10% ao ano. Wagner et al. (1986) relataram que, 8 anos após a aplicação de 200 kg de P ha<sup>-1</sup> a 400 kg de P ha<sup>-1</sup> a lanço, aproximadamente metade do fertilizante residual estava

em forma disponível para a planta. Sander et al. (1990) relataram que o efeito residual do P foi maior quando aplicado em sulcos do que a lanço. Segundo Eghball et al. (1990), dependendo da dose aplicada e da capacidade de fixação do solo, o fertilizante fosfatado aplicado em sulcos pode permanecer disponível para as plantas por 3 a 6 anos.

## **Restos culturais**

Observa-se, nas informações disponíveis na literatura, que a aplicação de restos culturais pode aumentar a disponibilidade de P e, conseqüentemente, a produtividade, em solos que possuem alta capacidade de fixação desse nutriente. Os Oxissolos e Ultissolos dos trópicos geralmente têm baixos teores de P disponível em seu estado natural (FAGERIA; BARBOSA FILHO, 1987). A matéria orgânica faz a complexação com Fe e, portanto, reduz a fixação de P em solos ácidos, aumentando a sua disponibilidade (EASTERWOOD; SARTAIN, 1990). Quando foram aplicados restos culturais de alfafa, milho, aveia, soja e trigo em vários solos, segundo Sharpley e Smith (1989), ocorreu diminuição na fixação de P e aumento em sua disponibilidade.

Os restos culturais geralmente contêm de 0,1% a 0,5% de P. Com a decomposição, os resíduos liberam P no solo.

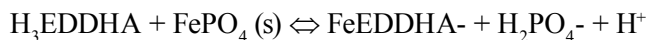
## **Aplicação de cloreto de potássio junto com fertilizantes fosfatados**

O N e o K são nutrientes comumente aplicados junto com o P na adubação das culturas. O N é aplicado geralmente na forma de amônio ou ureia, e o K na forma de cloreto de potássio (KCl). Ambos formam compostos fosfatados solúveis e, portanto, não causam precipitação do P. Entretanto, quando esses cátions e ânions são introduzidos no sistema do solo, as reações de troca aumentam a concentração de Ca na solução do solo (ERNANI; BARBER, 1990), o que pode precipitar o P. O aumento da força iônica também afeta a adsorção de P. Fageria (2009) mostraram que a adsorção de P aumenta com o incremento da concentração eletrolítica. Ernani e Barber (1991) mostraram que a aplicação de KCl junto com os fertilizantes fosfatados pode aumentar a disponibilidade de P em solos com baixo pH. Contudo, em solos com pH alto, o KCl pode diminuir a disponibilidade de P. Assim, deve-se evitar aplicá-lo junto com os fertilizantes fosfatados.



## Adição de quelatos de ferro sintéticos

Reid et al. (1985) demonstraram que quelatos sintéticos, como EDDHA, mobilizam Fe em solos com pH alto e Fe e P em solos com pH baixo. Para Jayachandran et al. (1989), um quelato forte de Fe pode aumentar a disponibilidade de P pela remoção do Fe de  $\text{FePO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  e, ao mesmo tempo, liberar P, como mostrado a seguir:



O aumento da solubilidade do P é temporário, porque o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  reage com os óxidos de ferro e reprecipita:



O resultado líquido é que não há aumento de P solúvel quando o equilíbrio é atingido. Desse modo, as plantas devem utilizar o P recém-liberado antes que ele se torne indisponível.

## Preparo do solo

O preparo adequado do solo envolve a eliminação da camada compactada e a incorporação de restos culturais. Com essa prática, aumenta a aeração do solo, o que incrementa a difusão de P e, conseqüentemente, sua absorção pelas plantas. O solo compactado traz vários prejuízos para a planta, como dificuldade na emergência das plântulas e no desenvolvimento do sistema radicular, e aumenta a erosão. Dolan et al. (1992) concluíram que a compactação das camadas superficial e subsuperficial pode reduzir a absorção de P pelo milho em até 22%.

## Uso de cultivares eficientes

O uso de cultivares eficientes na absorção e utilização de P é uma estratégia importante para reduzir os custos dos fertilizantes fosfatados e o risco de poluição do ambiente. Sabe-se que existem diferenças muito grandes na absorção e utilização de P entre espécies e cultivares da mesma espécie (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2008a).

A absorção de P aumenta com a melhoria da cinética de absorção (FAGERIA et al., 2008), com o maior comprimento das raízes (ROMER et al., 1988), com a maior relação entre raízes e parte aérea (FOHSE et al., 1988), com pelos radiculares maiores (CARADUS, 1982) e com micorrizas mais eficientes (SMITH; GIANINAZZI-PEARSON, 1988). Entre todos os

parâmetros da planta, Barber (1995) observou que a absorção de nutrientes é mais afetada pelas mudanças na taxa de crescimento das raízes. A melhor eficiência de uso do P pode resultar da melhor translocação (MARSCHNER, 1995) ou de uma relação favorável entre P orgânico e inorgânico (ELLIOTT; LAUCHLI, 1985). Na Figura 15, pode-se observar que o crescimento de duas cultivares de feijoeiro é diferente tanto em ausência como em alta dose de P.

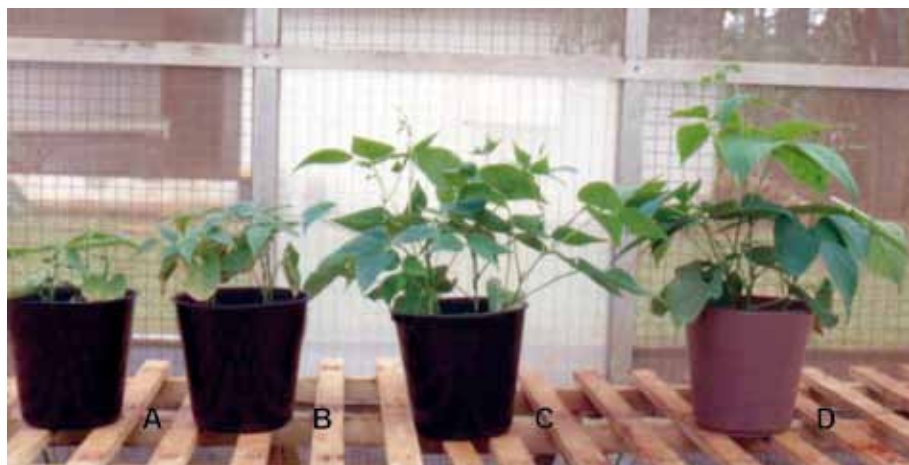


Foto: Sebastião Araújo.

**Figura 15.** Comparação do crescimento de duas cultivares de feijoeiro: cv. Carioca sem P (A); cv. Novo Jalo sem P (B); cv. Carioca com 200 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo (C); e cv. Novo Jalo com 200 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo (D).

Da mesma forma, verifica-se, na Tabela 11, resposta significativa de doses de P, genótipos e interação P versus genótipos. Houve resposta diferencial dos genótipos com a mudança da dose de P. Com base no índice de eficiência de produção de grãos (IEPG), os genótipos foram classificados como eficientes (IEPG maior do que 1,0), moderadamente eficientes (IEPG entre 0,5 e 1,0) e não eficientes (IEPG menor do que 0,5) no uso de P. (Tabela 12). O índice de eficiência foi calculado pela seguinte equação:

$$IEPG = \frac{PG_1}{PG_2} \times \frac{PG_3}{PG_4}$$

em que  $PG_1$  = produção de grãos em baixa dose de P,  $PG_2$  = produção média de grãos de 30 genótipos em baixa dose de P,  $PG_3$  = produção de grãos em alta dose de P e  $PG_4$  = produção média de 30 genótipos em alta dose de P.

**Tabela 11.** Massa da matéria seca da parte aérea (MSPA) e produção de grãos (PG) de 30 genótipos de feijoeiro com e sem doses de P<sup>(1)</sup>.

| Genótipo         | MSPA (g planta <sup>-1</sup> ) |                                  | PG (g planta <sup>-1</sup> ) |                                  |
|------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                  | Sem P                          | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) | Sem P                        | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| Aporé            | 1,09hi                         | 2,39m                            | 1,07hj                       | 8,64dh                           |
| Pérola           | 1,71ag                         | 4,25be                           | 1,68af                       | 9,36bf                           |
| BRSMG Talismã    | 1,64ah                         | 3,19fl                           | 1,49bi                       | 8,83dh                           |
| BRS Requite      | 1,72ag                         | 3,03hl                           | 1,65af                       | 8,48dj                           |
| BRS Pontal       | 2,13a                          | 3,58di                           | 2,11a                        | 10,78a                           |
| BRS 9435 Cometa  | 1,87ac                         | 3,32dj                           | 1,57bh                       | 9,72ad                           |
| BRS Estilo       | 1,76af                         | 3,38dj                           | 1,71ae                       | 9,42be                           |
| BRSMG Majestoso  | 1,81ae                         | 3,42dj                           | 1,46bi                       | 7,98gj                           |
| CNFC 10429       | 1,64ah                         | 2,45m                            | 1,45bi                       | 9,59ae                           |
| CNFC 10408       | 1,70ag                         | 2,17m                            | 1,97ab                       | 9,02cg                           |
| CNFC 10467       | 1,92ac                         | 4,87ac                           | 1,62ag                       | 8,15fj                           |
| CNFC 10470       | 2,07ab                         | 4,34bd                           | 1,89ac                       | 10,33ab                          |
| Diamante Negro   | 1,77af                         | 4,16bf                           | 1,55bh                       | 9,05cg                           |
| Corrente         | 1,45ci                         | 1,94m                            | 1,72ad                       | 10,17ac                          |
| BRS Valente      | 1,03i                          | 5,61a                            | 1,17ej                       | 9,47be                           |
| BRS Grafite      | 1,19fi                         | 4,12bg                           | 1,01ij                       | 8,35ej                           |
| BRS Campeiro     | 1,63ah                         | 2,61im                           | 1,10gj                       | 8,72dh                           |
| BRS 7762 Supremo | 1,52bi                         | 3,33dj                           | 1,54bi                       | 8,86dh                           |
| BRS Esplendor    | 1,61ah                         | 4,01ch                           | 1,59ah                       | 8,49dj                           |
| CNFP 10104       | 1,65ah                         | 4,20bf                           | 1,22di                       | 8,63di                           |
| Bambuí           | 1,53bi                         | 2,94im                           | 1,53bi                       | 7,66hl                           |
| BRS Marfim       | 1,45ci                         | 3,10gl                           | 1,41ci                       | 9,07bg                           |
| BRS Agreste      | 1,89ac                         | 5,05ac                           | 1,56bh                       | 8,90ch                           |
| BRS Pitanga      | 1,15gi                         | 4,11bg                           | 1,14fj                       | 7,68hl                           |
| BRS Vereda       | 1,24ei                         | 4,36bd                           | 1,07hj                       | 7,36il                           |
| EMGOPA Ouro      | 1,28di                         | 2,46m                            | 1,41ci                       | 7,87gj                           |
| BRS Radiante     | 1,41ci                         | 3,23ej                           | 1,48bi                       | 7,29gj                           |
| Jalo Precoce     | 1,58ai                         | 5,09ab                           | 1,55bh                       | 6,53m                            |
| BRS Executivo    | 1,84ad                         | 4,26be                           | 1,75ad                       | 8,39ej                           |
| BRS Embaixador   | 1,11hi                         | 3,69a                            | 0,66j                        | 5,33m                            |

Continua...

**Tabela 11.** Continuação.

| Genótipo                                | MSPA (g planta <sup>-1</sup> ) |                                  | PG (g planta <sup>-1</sup> ) |                                  |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|                                         | Sem P                          | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) | Sem P                        | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| Média                                   | 1,58b                          | 3,68a                            | 1,47b                        | 8,61a                            |
| <b>Teste F</b>                          |                                |                                  |                              |                                  |
| Dose de P ( <i>P</i> )                  | **                             |                                  | **                           |                                  |
| Genótipo ( <i>G</i> )                   | **                             |                                  | **                           |                                  |
| <i>P</i> versus <i>G</i>                | **                             |                                  | **                           |                                  |
| Coeficiente de variação (%) de <i>P</i> | 11,03                          |                                  | 9,71                         |                                  |
| Coeficiente de variação (%) de <i>G</i> | 9,97                           |                                  | 5,84                         |                                  |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2012).

**Tabela 12.** Índice de eficiência de produção de grãos de 30 genótipos de feijoeiro e sua classificação no uso de P<sup>(1)</sup>.

| Genótipo        | Índice de eficiência de produção de grãos <sup>(2)</sup> |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| Aporé           | 0,73im (ME)                                              |
| Pérola          | 1,24be (E)                                               |
| BRSMG Talismã   | 1,04dj (E)                                               |
| BRS Requite     | 1,10ch (E)                                               |
| BRS Pontal      | 1,79a (E)                                                |
| BRS 9435 Cometa | 1,20bf (E)                                               |
| BRS Estilo      | 1,27be (E)                                               |
| BRSMG Majestoso | 0,92em (E)                                               |
| CNFC 10429      | 1,10ch (E)                                               |
| CNFC 10408      | 1,41bc (E)                                               |
| CNFC 10467      | 1,03ej (E)                                               |
| CNFC 10470      | 1,53ab (E)                                               |

Continua...

**Tabela 12.** Continuação.

| <b>Genótipo</b>             | <b>Índice de eficiência de produção de grãos<sup>(2)</sup></b> |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Diamante Negro              | 1,10ch (E)                                                     |
| Corrente                    | 1,39bd (E)                                                     |
| BRS Valente                 | 0,87fm (ME)                                                    |
| BRS Grafite                 | 0,66m (ME)                                                     |
| BRS Campeiro                | 0,76hm (ME)                                                    |
| BRS 7762 Supremo            | 1,08ci (E)                                                     |
| BRS Esplendor               | 1,06ci (E)                                                     |
| CNFP 10104                  | 0,83gm (ME)                                                    |
| BambuÍ                      | 0,92em (ME)                                                    |
| BRS Marfim                  | 1,01el (E)                                                     |
| BRS Agreste                 | 1,09ch (E)                                                     |
| BRS Pitanga                 | 0,69m (ME)                                                     |
| BRS Vereda                  | 0,62n (ME)                                                     |
| EMGOPA Ouro                 | 0,87fm (ME)                                                    |
| BRS Radiante                | 0,85fm (ME)                                                    |
| Jalo Precoco                | 0,80hm (ME)                                                    |
| BRS Executivo               | 1,16cg (E)                                                     |
| BRS Embaixador              | 0,28n (IE)                                                     |
| Média                       | 1,01                                                           |
| <b>Teste F</b>              |                                                                |
| Genótipo                    | **                                                             |
| Coeficiente de variação (%) | 10,98                                                          |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

<sup>(2)</sup> E = eficiente; ME = moderadamente eficiente; e IE = ineficiente.

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2012).

A resposta do genótipo CNFC 10467 e da cultivar Aporé de feijoeiro à aplicação de P é ilustrada nas Figuras 16 e 17. Sob baixa dose de P, as plantas mostram deficiência de P (redução de crescimento e amarelamento de folhas mais velhas). O tratamento sem P levou à redução significativa da área foliar em comparação ao tratamento com 200 mg de P kg<sup>-1</sup> solo.

Fageria et al. (2012) também estudaram os efeitos de P no comprimento e na massa da matéria seca do sistema radicular de 30 genótipos de feijoeiro. Os resultados são apresentados na Tabela 13. Houve resposta significativa da dose de P e dos genótipos e da interação entre P e genótipos. O sistema radicular aumentou significativamente com a aplicação de 200 mg de P kg<sup>-1</sup> solo em comparação à testemunha (Figuras 18, 19 e 20). Como a maior parte do sistema radicular do feijoeiro situa-se nos primeiros 20 cm de profundidade (FREDDI et al., 2005; MONTANARI et al., 2010), a planta é muito sensível à falta de umidade e à compactação do solo (VIEIRA et al., 2005a). Assim, a diferença significativa entre genótipos no desenvolvimento do sistema radicular com a aplicação de P é ponto positivo na criação de cultivares com maior sistema radicular.

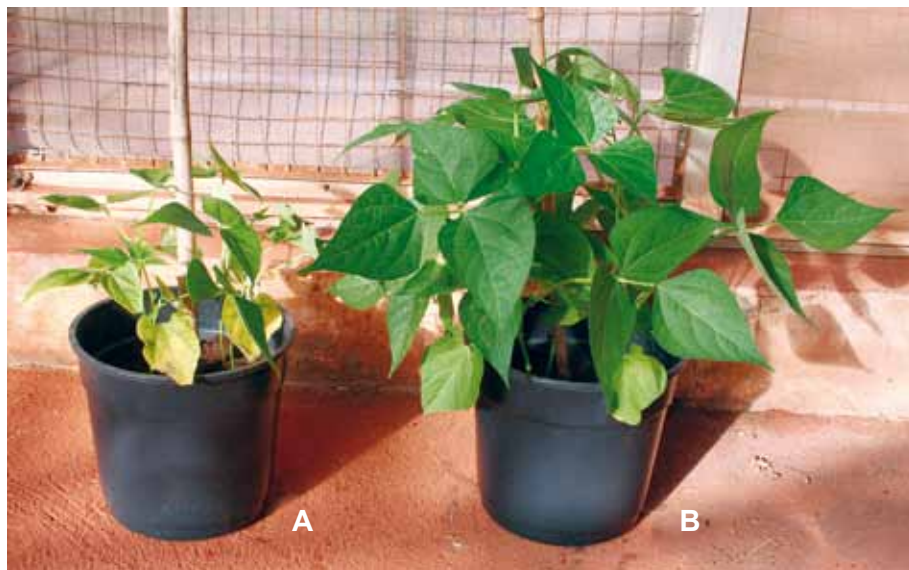


Foto: Sebastião Araújo.

**Figura 16.** Resposta do genótipo CNFC 10467 de feijoeiro à ausência (A) e à aplicação de fósforo (P) (B).

Fonte: Fageria et al. (2012).

Foto: Sebastião Araújo.



**Figura 17.** Resposta da cultivar Aporé de feijoeiro à ausência (A) e à aplicação de fósforo (P) (B).

**Tabela 13.** Comprimento máximo e massa da matéria seca das raízes de 30 genótipos de feijoeiro com e sem fósforo (P)<sup>(1)</sup>.

| Genótipo         | Comprimento máximo (cm) |                                  | Massa da matéria seca das raízes (g planta <sup>-1</sup> ) |                                  |
|------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|                  | Sem P                   | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) | Sem P                                                      | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| Aporé            | 21,00cf                 | 22,00bh                          | 0,33ab                                                     | 1,47ad                           |
| Pérola           | 22,33bd                 | 25,00ag                          | 0,44ab                                                     | 1,02ad                           |
| BRSMG Talismã    | 20,33cf                 | 30,67a                           | 0,32ab                                                     | 1,29ad                           |
| BRS Requite      | 28,00ab                 | 23,66ah                          | 0,51ab                                                     | 1,53ad                           |
| BRS Pontal       | 20,67cf                 | 19,00eh                          | 0,54a                                                      | 1,57ad                           |
| BRS 9435 Cometa  | 19,67cg                 | 26,33ad                          | 0,43ab                                                     | 1,35ad                           |
| BRS Estilo       | 22,00be                 | 21,33ch                          | 0,43ab                                                     | 1,00ad                           |
| BRSMG Majestoso  | 23,33ad                 | 30,67a                           | 0,26ab                                                     | 1,33ad                           |
| CNFC 10429       | 29,67a                  | 29,00ab                          | 0,36ab                                                     | 1,12ad                           |
| CNFC 10408       | 19,00ch                 | 20,00dh                          | 0,27ab                                                     | 0,88bd                           |
| CNFC 10467       | 19,33cg                 | 28,00ac                          | 0,39ab                                                     | 1,49ad                           |
| CNFC 10470       | 20,67cf                 | 26,00ae                          | 0,36ab                                                     | 1,45ad                           |
| Diamante Negro   | 18,67dh                 | 23,67ah                          | 0,42ab                                                     | 1,87ab                           |
| Corrente         | 15,67ei                 | 17,00h                           | 0,30ab                                                     | 0,74d                            |
| BRS Valente      | 25,33ac                 | 25,67af                          | 0,47ab                                                     | 1,97a                            |
| BRS Grafite      | 15,00fi                 | 20,33dh                          | 0,42ab                                                     | 1,42ad                           |
| BRS Campeiro     | 20,33cf                 | 20,33dh                          | 0,38ab                                                     | 1,17ad                           |
| BRS 7762 Supremo | 13,33gj                 | 18,67fh                          | 0,43ab                                                     | 1,31ad                           |
| BRS Esplendor    | 21,67be                 | 24,00ah                          | 0,52ab                                                     | 1,06ad                           |
| CNFP 10104       | 23,67ad                 | 21,67ch                          | 0,49ab                                                     | 1,49ad                           |
| BambuÍ           | 22,33bd                 | 19,33dh                          | 0,24ab                                                     | 1,16ad                           |
| BRS Marfim       | 13,67gj                 | 18,33gh                          | 0,40ab                                                     | 0,86bd                           |
| BRS Agreste      | 13,67gj                 | 19,33dh                          | 0,35ab                                                     | 1,81ac                           |
| BRS Pitanga      | 15,00fi                 | 24,00ah                          | 0,21b                                                      | 1,05ad                           |
| BRS Vereda       | 23,00bd                 | 25,67af                          | 0,41ab                                                     | 1,96a                            |
| EMGOPA Ouro      | 8,00j                   | 22,00bh                          | 0,26ab                                                     | 0,79cd                           |
| BRS Radiante     | 10,67ij                 | 18,67fh                          | 0,23ab                                                     | 0,60d                            |
| Jalo Precoce     | 13,33gj                 | 21,00ch                          | 0,25ab                                                     | 1,03ad                           |
| BRS Executivo    | 12,67hj                 | 21,00ch                          | 0,38ab                                                     | 1,20ad                           |

Continua...



**Tabela 13.** Continuação.

| Genótipo                                | Comprimento máximo (cm) |                                  | Massa da matéria seca das raízes (g planta <sup>-1</sup> ) |                                  |
|-----------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|                                         | Sem P                   | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) | Sem P                                                      | Com P (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| BRS Embaixador                          | 13,67g                  | 25,33ag                          | 0,30ab                                                     | 1,13ad                           |
| Média                                   | 18,86b                  | 22,65a                           | 0,38b                                                      | 1,27a                            |
| <b>Teste F</b>                          |                         |                                  |                                                            |                                  |
| Dose de P ( <i>P</i> )                  |                         | **                               | **                                                         |                                  |
| Genótipo ( <i>G</i> )                   |                         | **                               | **                                                         |                                  |
| <i>P</i> versus <i>G</i>                |                         | **                               | **                                                         |                                  |
| Coeficiente de variação (%) de <i>P</i> |                         | 8,07                             | 72,39                                                      |                                  |
| Coeficiente de variação (%) de <i>G</i> |                         | 12,78                            | 26,28                                                      |                                  |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2012).

Foto: Sebastião Araújo

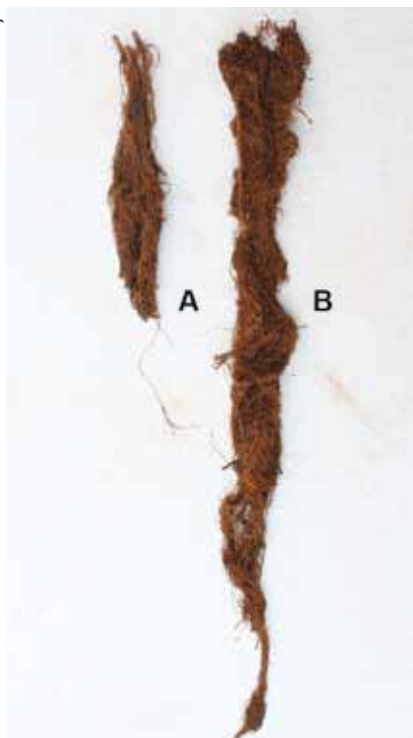


**Figura 18.** Influência de ausência (A) e presença (B) de fósforo (P) no sistema radicular da cultivar BRS Requite de feijoeiro.

Fonte: Fageria et al. (2012).

**Figura 19.** Influência de ausência (A) e presença (B) de fósforo (P) no sistema radicular da cultivar BRS 9435 Cometa de feijoeiro.  
Fonte: Fageria et al. (2012).

Foto: Sebastião Araújo

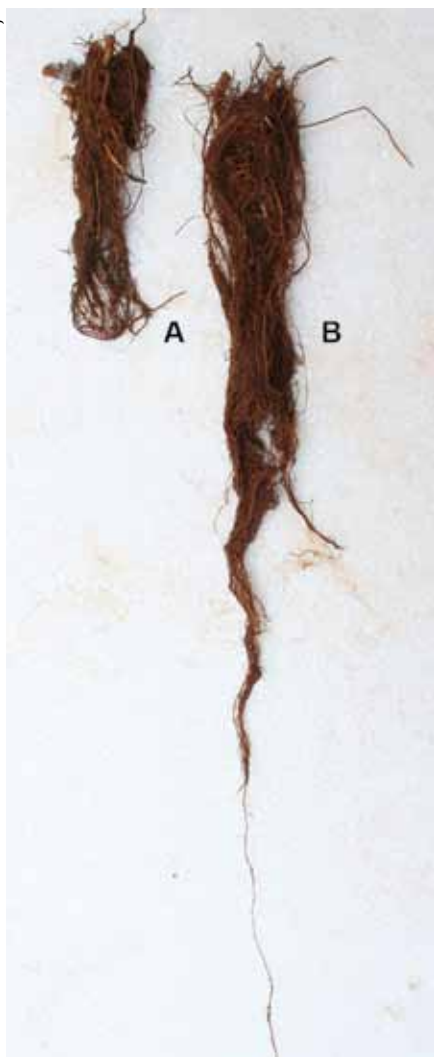


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 20.** Influência de ausência (A) e presença (B) de fósforo (P) no sistema radicular da cultivar BRS Estilo de feijoeiro.  
Fonte: Fageria et al. (2012).

## Uso de adubação orgânica

O esterco contém de 5 mg de P kg<sup>-1</sup> de matéria seca a 20 mg de P kg<sup>-1</sup> de matéria seca (OLSEN; BARBER, 1977). De modo geral, todo o P contido no esterco é insolúvel em água, mas sua disponibilidade persiste por mais tempo do que a de outros fertilizantes inorgânicos (ELIAS et al., 1980; MEEK et al., 1982). A limitação do uso de adubos orgânicos como fonte de P deve-se à necessidade de uso de quantidades muito grandes, sendo viável somente para pequenas propriedades.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O P é um dos nutrientes que limitam a produtividade do feijão por causa do seu baixo teor natural e da sua alta capacidade de fixação nos solos brasileiros. A maior parte do P solúvel aplicado é fixada em solos ácidos, como os de Cerrado e várzea, e não fica disponível durante o ciclo da cultura. O P participa de vários processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas; na cultura do feijoeiro, esse nutriente influencia no aumento da produção de matéria seca da parte aérea e no aumento do número de vagens e da massa de grãos, que são os principais determinantes do aumento da produtividade. Entre os componentes da produção, o número de vagens por unidade de área contribui mais para o aumento da produtividade do feijoeiro do que outros componentes. O P também faz aumentar o sistema radicular do feijoeiro, que é importante na absorção de água e nutrientes.

A eficiência de recuperação do P pela planta do feijoeiro é menor do que 10% em solos de Cerrado e pode variar dependendo da dose aplicada. Em compensação, a eficiência de uso do P (calculada a partir da produção de grãos por unidade de P acumulado na planta) é muito maior do que a de N e a de K. Portanto, a necessidade de P (acumulado na planta) é muito menor do que a de N e K. A maior parte (> 70%) do P acumulado na planta é translocada para os grãos. Existe uma correlação significativa e positiva entre a acumulação de P nos grãos e a produtividade do feijoeiro. Assim, existe possibilidade de aumentar a produtividade da cultura com o aumento de taxa de absorção de P, que pode ser melhorada com o uso de práticas apropriadas, como preparo do solo, uso de calagem e adubação nitrogenada, densidade e espaçamento, uso de cultivar de alto potencial e eficiente no uso de P, prevenção de deficiência hídrica, uso de rotação apropriada e controle de doenças, pragas e plantas daninhas. Além disso, as recomendações de adubação devem ser feitas de acordo com a análise de solo.

## Capítulo 6

# Potássio

## INTRODUÇÃO

Grande parte das áreas exploradas com feijoeiro no território brasileiro encontra-se em regiões tropicais (em que predominam formações de solos de elevado grau de intemperismo), as quais são submetidas principalmente a programas de adubação potássica (BORKERT et al., 2005; FOLONI; ROSOLEM, 2008). De acordo com Fageria (2009), a deficiência de potássio (K) ocorre principalmente em solos com baixo teor de K, em solos arenosos, altamente intemperizados e lixiviados e em solos mal drenados e altamente reduzidos, em que a absorção de K é inibida pela presença de  $H_2S$ , ácidos orgânicos e excesso de ferro (Fe). Após o nitrogênio (N), o K é o nutriente absorvido pelo feijoeiro em maior quantidade (Tabela 1). A deficiência desse nutriente é esperada em cultivos intensivos. Cerca de um terço dos solos brasileiros tem baixo teor de K (MALAVOLTA, 1985). Villa et al. (2004) relataram resposta do feijoeiro à aplicação de K em Gleissolos de várzea de Minas Gerais.

**Tabela 1.** Acumulação de nutrientes na cultura do feijoeiro.

| Nutriente                             | Acumulação de nutrientes |      |       |
|---------------------------------------|--------------------------|------|-------|
|                                       | Parte aérea              | Grão | Total |
| Nitrogênio (N) (kg ha <sup>-1</sup> ) | 19                       | 68   | 87    |
| Fósforo (P) (kg ha <sup>-1</sup> )    | 1                        | 6    | 7     |
| Potássio (K) (kg ha <sup>-1</sup> )   | 25                       | 36   | 61    |
| Cálcio (Ca) (kg ha <sup>-1</sup> )    | 16                       | 6    | 22    |
| Magnésio (Mg) (kg ha <sup>-1</sup> )  | 7                        | 4    | 11    |
| Zinco (Zn) (g ha <sup>-1</sup> )      | 29                       | 74   | 103   |
| Cobre (Cu) (g ha <sup>-1</sup> )      | 8                        | 22   | 30    |
| Ferro (Fe) (g ha <sup>-1</sup> )      | 268                      | 144  | 412   |
| Manganês (Mn) (g ha <sup>-1</sup> )   | 73                       | 27   | 100   |
| Boro (B) (g ha <sup>-1</sup> )        | 20                       | 12   | 34    |

Fonte: adaptado de Fageria e Stone (2008).

Em vários trabalhos realizados no Brasil, verificou-se resposta da cultura do feijoeiro à aplicação de K (BARBOSA FILHO; SILVA, 1994; CHAGAS et al., 1995; FAGERIA; BALIGAR, 1996, 1997; FAGERIA;

RAIJ, 1991). Porém, trabalhos de adubação com K conduzidos em diversas regiões de País também mostraram que a frequência de resposta é muito baixa e, quando existente, é de pequena magnitude (ROSOLEM, 1996). A resposta das culturas à adubação potássica não é tão acentuada quanto à adubação com fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em solos de Cerrado e várzeas do Brasil (FAGERIA; BALIGAR, 1997, 1999). A maior parte do K consumido no Brasil é importada; portanto, do ponto de vista econômico, seu uso racional na produção das culturas é muito importante para o País.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O conhecimento sobre a dinâmica de disponibilidade de K para as plantas tem sido gerado, em sua maior parte, nas regiões temperadas. Nas regiões tropicais, os estudos têm enfatizado a quantificação de K trocável e a relação existente entre essa forma e sua absorção pelas plantas (MELO et al., 2004). Melo et al. (2004) relataram que, dentre os nutrientes essenciais às plantas, é possível que o K seja aquele cuja dinâmica de disponibilidade esteja mais intimamente relacionada com a composição mineralógica do solo, razão por que é fundamental que haja estudos que relacionem mineralogia com disponibilidade de K.

O ciclo do K no sistema solo-planta envolve vários processos, como adsorção, dissolução, transporte, lixiviação e absorção pelas plantas (Figura 1). A taxa de fornecimento dos nutrientes para as plantas é determinada pelas propriedades do solo, como textura, mineralogia, temperatura e pH, e pelo sistema radicular. O conteúdo de K na litosfera é de aproximadamente 2,6%, com média de 0,83% nos solos (LINDSAY, 1979). De acordo com a Figura 1, o K está presente no solo sob quatro formas, que estão em equilíbrio dinâmico. Uma pequena parte do K encontra-se na solução do solo na forma trocável, e a maior parte encontra-se nos minerais do solo. Os principais minerais primários que possuem K são moscovita, biotita, microclina e ortoclásio, mas outras micas e feldspatos também podem conter quantidades substanciais desse elemento (FAGERIA et al., 1999).

A aplicação de grandes quantidades de K no solo pode transformar a fração que está em forma trocável e solúvel em água em uma forma não trocável. Esse processo é chamado de fixação e ocorre por meio de dois mecanismos: fixação por argilas 2:1 e formação de compostos insolúveis de K, em especial aluminossilicatos (SHAVIV et al., 1985). A fixação pode

afetar a recuperação do K aplicado, principalmente em solos com baixo teor desse nutriente. Stout (1982), ao estudar a recuperação do K em vários solos nos Estados Unidos, encontrou percentuais que variaram de 60% (em solos com baixos teores de mica ou vermiculita) a 15% (em solos com teores moderados dessas argilas). O K não forma complexos com a matéria orgânica como o fazem o N e o P. Portanto, a influência do K orgânico é muito pequena na absorção e utilização desse elemento pelas plantas.

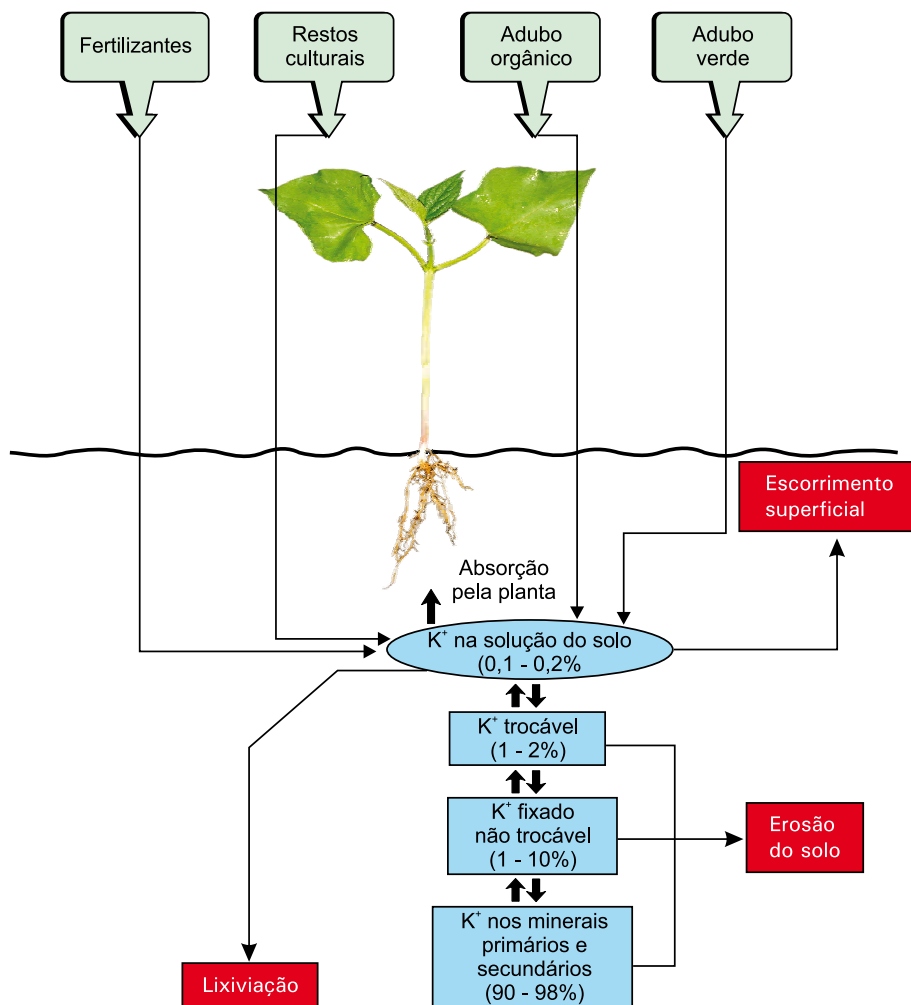


**Figura 1.** Ciclo do potássio no sistema solo-planta.

Ilustração: Sebastião Araújo

A absorção de K durante o crescimento da planta é um processo dinâmico, com períodos de diminuição desse nutriente na rizosfera e de liberação da fração não trocável para a trocável na solução do solo (RITCHEY, 1982). Em muitos solos tropicais, não ocorrem reduções nas produtividades nos cultivos sucessivos, não há resposta às adubações potássicas e, além disso, a quantidade de K absorvido pelas plantas é superior ao teor de K trocável (SILVA et al., 1995). Havlin e Westfall (1985) mostraram que a taxa e a quantidade de K não trocável liberado durante o cultivo intensivo de alfafa, em casa de vegetação, estavam diretamente relacionadas com o teor de argila de vários solos. Esses autores também relataram que os solos argilosos têm capacidade de suprimento de K a longo prazo, o que não ocorre nos solos arenosos. Reddy (1976), em trabalho de campo, observou que os solos com textura média e argilosa foram capazes de fornecer quantidade suficiente de K para produzir 12 t de alfafa ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> num período de 3 anos, enquanto os solos arenosos forneceram somente a quantidade suficiente para 1 ano. Os solos arenosos, em geral, têm baixa capacidade-tampão de K em comparação com os solos franco-argilosos (URIBE; COX, 1988).

Experimentos de curta e longa durações, em vasos e no campo, tanto em solos oxidados como em reduzidos, demonstraram que a quantidade do K trocável tende a diminuir até um nível mínimo, variável com o tipo de solo, e que, concomitantemente a essa depleção, ocorre diminuição da quantidade do K de formas não trocáveis, quando, então, o suprimento de K às plantas passa a ser dependente da liberação de tais formas (FRAGA et al., 2009; SILVA et al., 1995). Quando o teor de K é diminuído na solução do solo, ocorre a liberação de K não trocável, o que pode contribuir para o suprimento das necessidades das plantas (CASTILHOS et al., 2002; FRAGA et al., 2009).

## FUNÇÕES E SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

O K participa em vários processos fisiológicos e bioquímicos das plantas. As funções importantes do K podem ser assim resumidas (FAGERIA et al., 1999): 1) aumenta a massa da matéria seca da parte aérea e, conseqüentemente, a produtividade (Figuras 2 a 5); 2) estimula a atividade de várias enzimas; 3) reduz a respiração, diminuindo as perdas de energia; 4) ajuda no processo de fotossíntese; 5) ajuda na translocação de açúcares e amido; 6) produz grãos ricos em amido; 7) aumenta o teor de proteínas nos grãos; 8) mantém o turgor e reduz a perda de água e o



murchamento das plantas; 9) reduz a ocorrência de doenças; 10) aumenta a absorção e a translocação de ferro nas plantas; 11) aumenta o sistema radicular do feijoeiro, tanto em solos de Cerrado como em várzea; e 12) quando deficiente, pode inibir a fixação de  $N_2$  em razão da redução do crescimento em leguminosas (Figuras 6 a 9).

Foto: Sebastião Araújo

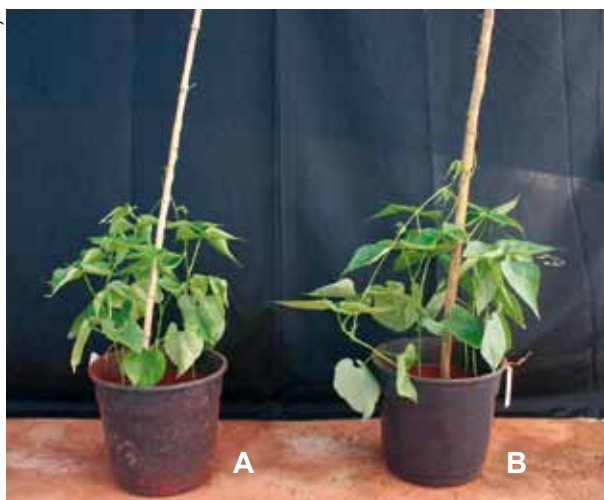


**Figura 2.** Resposta da cultivar Pérola de feijoeiro à ausência (A) e à aplicação de potássio (B) em solo de Cerrado.

**Figura 3.** Resposta do genótipo CNFP 10104 de feijoeiro à ausência (A) e à aplicação de potássio (K) (B) em solo de Cerrado.

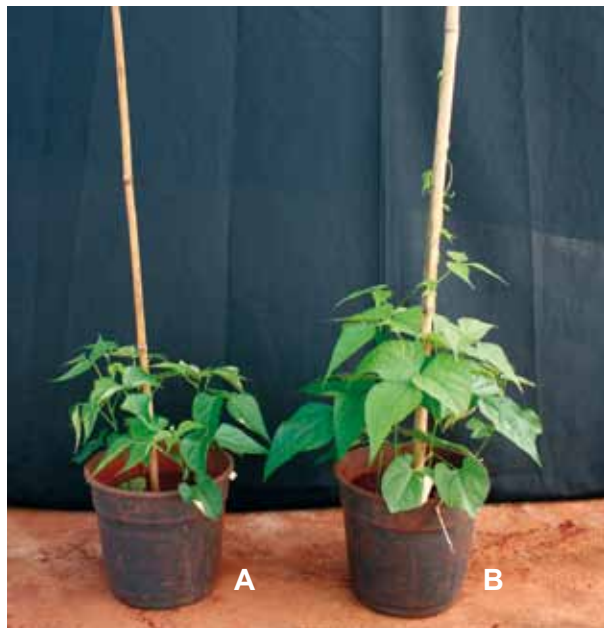


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 4.** Resposta da cultivar BRS Estilo de feijoeiro à ausência (A) e à aplicação de potássio (K) (B) em solo de várzea.



Foto: Sebastião Araújo

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 5.** Resposta da cultivar Pérola de feijoeiro à ausência (A) e à aplicação de potássio (K) (B) em solo de várzea.

Foto: Sebastião Araújo

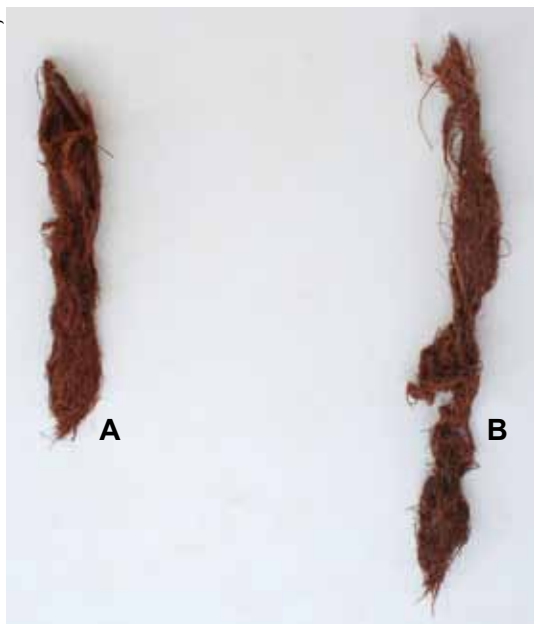


**Figura 6.** Influência do potássio (K) no desenvolvimento do sistema radicular da cultivar BRS Marfim de feijoeiro em solo de Cerrado. Ausência de K (A) e presença de 200 mg de K kg<sup>-1</sup> (B).

**Figura 7.** Influência do potássio (K) no desenvolvimento do sistema radicular da cultivar Pérola de feijoeiro em solo de Cerrado. Ausência de K (A) e presença de 200 mg de K kg<sup>-1</sup> (B).

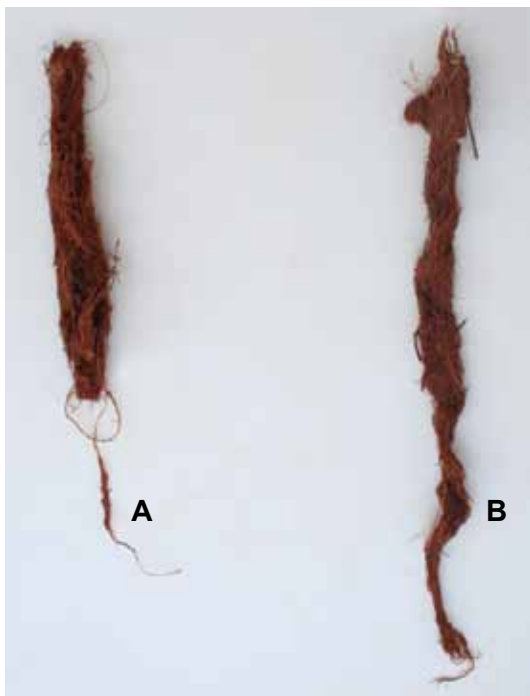


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 8.** Influência do potássio (K) no desenvolvimento do sistema radicular do genótipo CNFC 10470 de feijoeiro em solo de várzea. Ausência de K (A) e presença de 200 mg de K kg<sup>-1</sup> (B).



Foto: Sebastião Araújo

Foto: Sebastião Araújo

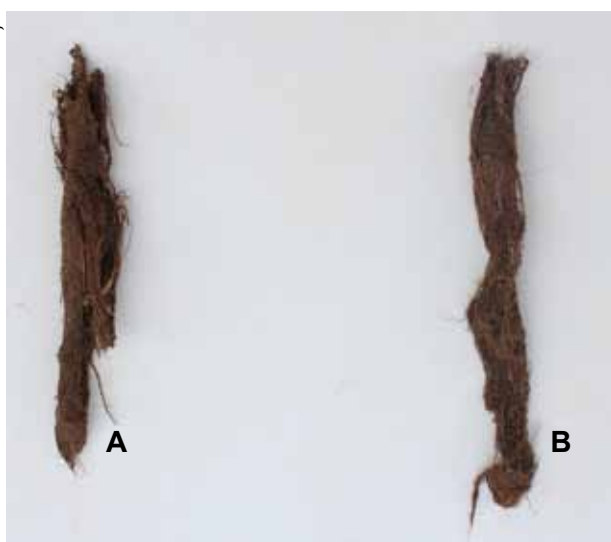


**Figura 9.** Influência do potássio (K) no desenvolvimento do sistema radicular da cultivar BRS Agreste de feijoeiro em solo de várzea. Ausência de K (A) e presença de 200 mg de K kg<sup>-1</sup> (B).

O K é móvel na planta; portanto, os sintomas de sua deficiência aparecem principalmente nas folhas mais velhas. À medida que o grau de deficiência se intensifica, o tecido torna-se marrom e necrótico na ponta da folha, e o sintoma progride pela margem da mesma, desenvolvendo-se mais na metade da folha (Figura 10 e 11). As plantas deficientes em K têm

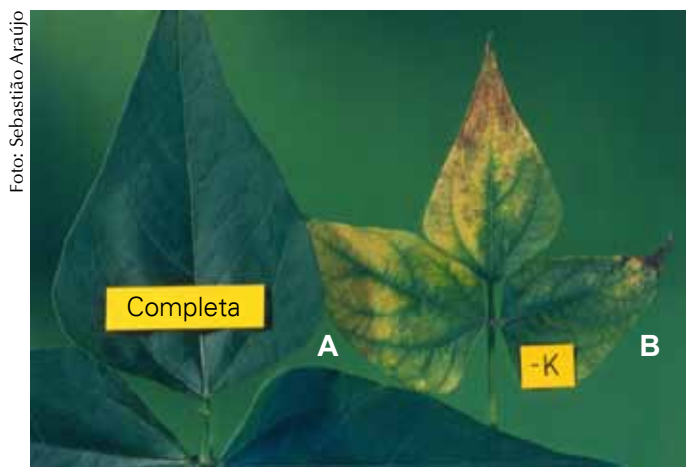


**Figura 10.** Folhas de feijoeiro sem (A) e com deficiência (B) de potássio (K). “Completa” = contém todos os nutrientes, incluindo K; “-K” = contém todos os nutrientes, exceto K.  
Fonte: Fageria et al. (1996).



**Figura 11.** Sintomas de deficiência de potássio (K) na planta do feijoeiro.  
Fonte: Fageria et al. (1996).

crescimento reduzido, sistema radicular pouco desenvolvido, suscetibilidade ao acamamento (pois os caules são frágeis), diminuição do tamanho dos grãos e baixa resistência às doenças. Quando ocorre deficiência de K em pastagens consorciadas de gramíneas com leguminosas, as gramíneas praticamente eliminam as leguminosas por causa da sua alta capacidade de extração desse nutriente.

## CONCENTRAÇÃO E ACUMULAÇÃO NAS PLANTAS

O teor e a acumulação de K na parte aérea e nos grãos são importantes parâmetros para identificar a deficiência ou suficiência nutricional nas plantas. Na Tabela 2, são apresentados dados relacionados à produção de massa da matéria seca da parte aérea, ao teor e à acumulação de K na parte aérea e nos grãos do feijoeiro de acordo com a idade da planta. O teor de K diminuiu linearmente com o aumento da idade da planta.

**Tabela 2.** Teor e acumulação de potássio (K) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro. Os valores são médias de 2 anos de ensaios de campo.

| Idade (em dias)                                                                                                | Teor de K<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | Acumulação de K<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|
| 15                                                                                                             | 34,7                               | 3,73                                      |
| 29                                                                                                             | 33,2                               | 11,72                                     |
| 43                                                                                                             | 27,5                               | 20,21                                     |
| 62                                                                                                             | 25,8                               | 51,65                                     |
| 84                                                                                                             | 19,5                               | 64,23                                     |
| 96 (colheita), na parte aérea                                                                                  | 15,8                               | 24,86                                     |
| 96 (colheita), nos grãos                                                                                       | 18,7                               | 35,54                                     |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                    |                                    |                                           |
| Idade (X) vs. Teor de K na parte aérea (Y) = $38,8141 - 0,2327 X$ , $R^2 = 0,98^{**}$                          |                                    |                                           |
| Idade (X) vs. Acumulação de K na parte aérea (Y) = $0,6708 \exp. (0,1222 X - 0,00085 X^2)$ , $R^2 = 0,95^{**}$ |                                    |                                           |

**\*\*** Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Santos (2008a).

Na colheita, a diminuição no teor de K foi de 120% em comparação com o teor medido aos 15 dias de idade. Isso significa que, na avaliação do estado nutricional das plantas, a idade é fator importante e deve ser levada em consideração. Na colheita, o teor de K nos grãos foi 18% maior do que o medido na parte aérea. Fageria et al. (2008) relataram o valor de 15,5 g de K kg<sup>-1</sup> na parte aérea do feijoeiro na época de colheita e 16,8 g de K kg<sup>-1</sup> nos grãos, valores bem próximos dos resultados da Tabela 2.

A acumulação de K na parte aérea foi significativamente influenciada pelo avanço da idade da planta. A acumulação seguiu uma forma quadrática com a idade da planta. O aumento na acumulação de K na parte aérea na colheita foi de 566% em comparação com a acumulação medida aos 15 dias de idade. A acumulação de K na parte aérea seguiu o padrão de acumulação da massa da matéria seca da parte aérea (FAGERIA, 2009). Nos grãos, a exportação de K foi de 59% do total de K acumulado na planta. Fageria e Santos (2008a) relataram acumulação nos grãos do feijoeiro de 66% do total de K acumulado na planta.

## EFICIÊNCIA DE USO

A eficiência de uso dos nutrientes é um aspecto importante na produção das culturas sob os pontos de vista econômico e ambiental. Na Tabela 3, são apresentados os resultados da eficiência de uso do K na parte aérea e nos grãos do feijoeiro. Houve aumento significativo no uso de K na parte aérea com o avanço da idade da planta. Na época de colheita, a eficiência do uso de K foi maior na parte aérea do que nos grãos.

Na Tabela 4, são apresentados resultados da produção de grãos e de massa da matéria seca da parte aérea influenciados por genótipos e doses de K, que apresentaram respostas significativas. Houve interação significativa entre K e genótipos, o que significa variação na massa da matéria seca da parte aérea com a mudança da dose de K no solo. Porém, a resposta variou de genótipo para genótipo. Isso indica que existe possibilidade de criar genótipos de feijoeiro para serem mais eficientes no uso de K.

**Tabela 3.** Eficiência do uso de potássio (K) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro durante o ciclo da cultura. Os valores são médias de 2 anos de ensaios de campo.

| Idade (em dias)                                                                                                               | Eficiência do uso de K (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 15                                                                                                                            | 32,3                                                         |
| 29                                                                                                                            | 34,3                                                         |
| 43                                                                                                                            | 44,8                                                         |
| 62                                                                                                                            | 40,8                                                         |
| 84                                                                                                                            | 56,9                                                         |
| 96 (colheita), na parte aérea                                                                                                 | 71,0                                                         |
| 96 (colheita), nos grãos                                                                                                      | 53,7                                                         |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                                   |                                                              |
| Idade (X) vs. Eficiência do uso de K na parte aérea (Y) = 35,0541 – 0,1577 X + 0,0052 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,92* |                                                              |

<sup>(1)</sup> Massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos/K acumulado na parte aérea ou nos grãos.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

**Tabela 4.** Produção de grãos e de matéria seca da parte aérea de 15 genótipos de feijoeiro com e sem K.

| Genótipo        | Produção de grãos<br>(g planta <sup>-1</sup> ) | Massa da matéria seca da parte aérea<br>(g planta <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |                                  |
|-----------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|                 |                                                | Sem K                                                                            | Com K (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| Aporé           | 5,59a                                          | 2,62efg                                                                          | 3,23abcde                        |
| Pérola          | 5,46a                                          | 5,02ab                                                                           | 4,58a                            |
| BRSMSG Talismã  | 5,22abc                                        | 3,55cde                                                                          | 3,93abc                          |
| BRS Requite     | 5,17abc                                        | 2,09g                                                                            | 2,08e                            |
| BRS Pontal      | 5,27abc                                        | 2,74efg                                                                          | 1,98e                            |
| BRS 9435 Cometa | 4,31cd                                         | 3,28def                                                                          | 2,74cde                          |

Continua...



**Tabela 4.** Continuação.

| Genótipo                                   | Produção de grãos<br>(g planta <sup>-1</sup> ) | Massa da matéria seca da parte aérea<br>(g planta <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
|                                            |                                                | Sem K                                                                            | Com K (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| BRS Estilo                                 | 4,41bcd                                        | 2,39fg                                                                           | 2,19e                            |
| CNFC 10408                                 | 5,20abc                                        | 3,54cde                                                                          | 2,51de                           |
| CNFC 10470                                 | 4,85abc                                        | 4,42abc                                                                          | 2,03e                            |
| Diamante Negro                             | 4,87abc                                        | 4,30bcd                                                                          | 3,12bcde                         |
| Corrente                                   | 4,82abc                                        | 2,50efg                                                                          | 2,65cde                          |
| BRS Valente                                | 5,36ab                                         | 5,37a                                                                            | 3,95abc                          |
| BRS Grafite                                | 3,48d                                          | 2,51efg                                                                          | 2,50de                           |
| BRS Marfim                                 | 5,11abc                                        | 1,89g                                                                            | 4,20ab                           |
| BRS Agreste                                | 5,51a                                          | 3,42cdef                                                                         | 3,78abcd                         |
| Média                                      | 4,98                                           | 3,31a                                                                            | 3,03a                            |
| Sem K                                      | 4,61b                                          |                                                                                  |                                  |
| Com K (200 mg kg <sup>-1</sup> )           | 5,34a                                          |                                                                                  |                                  |
| <b>Teste F</b>                             |                                                |                                                                                  |                                  |
| Dose de K ( <i>K</i> )                     | **                                             |                                                                                  | ns                               |
| Genótipo ( <i>G</i> )                      | **                                             |                                                                                  | **                               |
| <i>K</i> versus <i>G</i>                   | ns                                             |                                                                                  | **                               |
| Coeficiente de<br>variação (%) de <i>K</i> | 10,71                                          |                                                                                  | 17,40                            |
| Coeficiente de<br>variação (%) de <i>G</i> | 9,51                                           |                                                                                  | 12,67                            |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pelas mesmas letras, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria e Melo (2014).

## INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DE POTÁSSIO NO ÍNDICE DE COLHEITA DE GRÃOS E NO ÍNDICE DE COLHEITA DE POTÁSSIO

O índice de colheita de grãos e o índice de colheita de K são importantes características na determinação da produtividade e da eficiência do uso de K pelas culturas. Em trabalho realizado na Embrapa Arroz e Feijão (FAGERIA et al., 2001), foi observada a influência de doses de K no índice de colheita de grãos e no índice de colheita de K (Tabela 5), além do fato de que o índice de colheita de grãos varia de genótipo para genótipo.

**Tabela 5.** Índice de colheita de grãos e índice de colheita de K com e sem aplicação de K<sup>(1)</sup>.

| Genótipo       | Índice de colheita de grãos <sup>(2)</sup> |                                  | Índice de colheita de K <sup>(3)</sup> |                                  |
|----------------|--------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
|                | Sem K                                      | Com K (200 mg kg <sup>-1</sup> ) | Sem K                                  | Com K (200 mg kg <sup>-1</sup> ) |
| Iraí           | 0,51a                                      | 0,52ab                           | 0,48ab                                 | 0,50ab                           |
| Jalo Precoce   | 0,44ab                                     | 0,43b                            | 0,62ab                                 | 0,42ab                           |
| Novo Jalo      | 0,51a                                      | 0,51ab                           | 0,63ab                                 | 0,53ab                           |
| L 93300166     | 0,30b                                      | 0,51ab                           | 0,50ab                                 | 0,51ab                           |
| L 93300176     | 0,51a                                      | 0,57a                            | 0,53ab                                 | 0,37ab                           |
| Carioca        | 0,52a                                      | 0,50ab                           | 0,67a                                  | 0,57a                            |
| Diamante Negro | 0,41ab                                     | 0,48ab                           | 0,31b                                  | 0,51ab                           |
| Pérola         | 0,47a                                      | 0,57a                            | 0,59ab                                 | 0,46ab                           |
| Rosinha G-2    | 0,55a                                      | 0,57a                            | 0,68a                                  | 0,53ab                           |
| Xamego         | 0,42ab                                     | 0,42b                            | 0,55ab                                 | 0,33b                            |
| Média          | 0,46                                       | 0,51                             | 0,56                                   | 0,47                             |
| <b>Teste F</b> |                                            |                                  |                                        |                                  |
| Doses de K (K) | **                                         |                                  | **                                     |                                  |
| Genótipos (G)  | **                                         |                                  | **                                     |                                  |
| K versus G     | **                                         |                                  | *                                      |                                  |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pelas mesmas letras, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

<sup>(2)</sup> Índice de colheita de grãos = Produtividade de grãos/Produtividade de grãos e de massa da matéria seca da parte aérea.

<sup>(3)</sup> Índice de colheita de K = Acumulação de K nos grãos/Acumulação de K nos grãos e na parte aérea.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2001).

Na média, houve aumento de 11% na produtividade de grãos com a aplicação de 200 mg de K kg<sup>-1</sup> de solo em comparação com a ausência de aplicação de K no solo. O índice de colheita de K também foi influenciado significativamente pelos genótipos e pelas doses de K. Entre os componentes da produtividade e características associadas, o número de grãos por vagem apresentou alta correlação com a produtividade de grãos, seguido por massa da matéria seca da parte aérea, número de vagens por planta e índice de colheita de grãos (Tabela 6).

**Tabela 6.** Correlação entre produtividade de grãos e seus componentes e características associadas.

| Variável                             | Produtividade de grãos |
|--------------------------------------|------------------------|
| Massa da matéria seca da parte aérea | 0,78**                 |
| Número de vagens por planta          | 0,62**                 |
| Número de grãos por vagem            | 0,82**                 |
| Índice de colheita de grãos          | 0,39**                 |
| Massa de 100 grãos                   | -0,03 <sup>ns</sup>    |
| Índice de colheita de K              | -0,21 <sup>ns</sup>    |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: Fageria et al. (2001).

## ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO

Assim como para o N e o P, as práticas de manejo adequadas podem melhorar a eficiência de absorção do K pelas culturas e, consequentemente, aumentar a produtividade. Na revisão de Rosolem (1997), argumentou-se que o manejo adequado da adubação potássica, no que diz respeito às quantidades de adubo a serem aplicadas, pode reduzir perdas, o que é importante dos pontos de vista econômico e ambiental. Porém, se a aplicação de K for subestimada, pode haver esgotamento das reservas de K no solo. Segundo Novais (1999), os teores de K disponíveis tendem a declinar rapidamente com as sucessivas colheitas, principalmente em solos de textura média a arenosa, com alta produtividade de grãos. Para manejo adequado de K, as seguintes práticas podem ser adotadas: 1) aplicação de doses adequadas; 2) aplicação na época apropriada; 3) uso de métodos

adequados de aplicação; 4) uso de fontes apropriadas; 5) uso de cultivares eficientes; 6) incorporação de restos culturais; 7) manutenção de umidade adequada no solo; e 8) uso de calagem em solos ácidos. Além dessas práticas, o controle de insetos, doenças e plantas daninhas, discutido para N e P, também é aplicável para o uso eficiente do K.

## Doses adequadas

Por causa da introdução de cultivares de alto potencial produtivo e do aumento do uso do sistema de cultivo múltiplo, aumentou a remoção de K dos solos. A aplicação de fertilizantes nitrogenados e fosfatados aumentou, havendo necessidade de maior quantidade de fertilizantes potássicos. Assim, é importante conhecer as respostas das culturas à aplicação de K. O nível adequado desse nutriente varia entre as espécies e entre cultivares da mesma espécie. Outros fatores que determinam a necessidade de K são o nível de produtividade, a população de plantas e os fatores do ambiente, como temperatura e aeração do solo. Os melhores parâmetros para determinar o nível adequado de K são a curva de resposta da cultura à aplicação desse nutriente e a análise correspondente do solo, a qual é chamada de curva de calibração.

Brunetto et al. (2005) relataram que o nível crítico de K, extraído com Mehlich 1, em Argissolos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina foi de 42 mg kg<sup>-1</sup> do solo. Rheinheimer et al. (2001) relataram que o nível crítico de K para a maioria dos solos do Rio Grande do Sul é de 60 mg kg<sup>-1</sup>. Porém, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo-RS/SC (2004) relatou os níveis críticos de 45 mg kg<sup>-1</sup> para solos com CTC<sup>1</sup> < 5,0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; 60 mg kg<sup>-1</sup> para solos com CTC entre 5,1 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> e 15 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; e 90 mg kg<sup>-1</sup> para solos com CTC > 15 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. Schlindwein et al. (2011) relataram os teores críticos de K com a solução de Mehlich 1 (89,5 mg kg<sup>-1</sup>), com o extrator Mehlich 3 (91,6 mg kg<sup>-1</sup>) e com o extrator resina (83,8 mg kg<sup>-1</sup>) na camada de 0 a 20 cm de profundidade para culturas anuais no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina. O nível crítico de K na camada de 0 a 20 cm de profundidade, determinado por Mehlich 1, no Programa de Recomendações de Fertilizantes em Minas Gerais, é de 70 mg kg<sup>-1</sup> (RIBEIRO et al., 1999). No Cerrado brasileiro, os níveis críticos são 40 mg kg<sup>-1</sup> (em solos com pH 7,0 e CTC menor do que 4) e 80 mg kg<sup>-1</sup> (em solos com pH 7,0 e CTC superior ou igual a 4 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) (SOUSA; LOBATO, 2002).

<sup>1</sup> Capacidade de troca de cátions.

O valor absoluto mínimo de K para os solos tropicais sob culturas anuais está em torno de 39 mg kg<sup>-1</sup>, podendo variar de 27 mg kg<sup>-1</sup> a 78 mg kg<sup>-1</sup>, dependendo do solo e da espécie de planta envolvidos (FAGERIA et al., 1999). Níveis abaixo de 50 mg kg<sup>-1</sup> de solo geralmente são inadequados para o crescimento normal das plantas. De acordo com a experiência dos autores deste livro, quando o teor de K é menor do que 50 mg kg<sup>-1</sup>, é necessário aplicar de 100 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> a 120 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> no sulco na época da semeadura. Por outro lado, quando o teor de K é maior do que 50 mg kg<sup>-1</sup> de solo, é necessário aplicar em torno de 60 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> a 80 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> para obter produtividade do feijoeiro em torno de 3.000 kg ha<sup>-1</sup>.

### Época de aplicação

Geralmente, os fertilizantes potássicos são aplicados na época da semeadura, mas em solos tropicais, onde existe alta precipitação, há possibilidade de lixiviação e perdas por erosão. Os Oxissolos e Ultissolos, dois grupos de solos ácidos predominantes nas regiões tropicais, possuem baixa CTC e retenção de K. Nesse caso, recomenda-se a aplicação parcelada de K para reduzir as perdas por lixiviação. Ainda, no caso da adubação potássica, o cloreto de potássio é a principal fonte de K utilizada nas culturas produtoras de grãos no Brasil (LOPES, 2005). O cloreto de potássio é altamente solúvel em água, e o íon K<sup>+</sup> apresenta baixa força de adsorção aos colóides do solo (RAIJ, 1991), o que faz com que o parcelamento de doses de K acima de 60 kg ha<sup>-1</sup> seja frequentemente recomendado, a fim de reduzir as perdas de K<sup>+</sup> por lixiviação e o efeito salino dos adubos sobre as sementes na instalação das culturas, especialmente nos cultivos em solos arenosos (FOLONI; ROSOLEM, 2008; RAIJ et al., 1997). Comparando distintas formas de manejo de água e de fertilizante potássico no desempenho do arroz irrigado, em condições tropicais, Santos et al. (1999a) verificaram que, com a inundação contínua, o parcelamento de K aumenta o seu aproveitamento e deve ser empregado, especialmente em várzeas de solos mais arenosos. Quanto a alguns atributos químicos de um Gleissolo, o manejo de água e de fertilizante potássico afeta a distribuição dos nutrientes no solo e, conseqüentemente, a sua disponibilidade para as culturas (SANTOS et al., 2002). A maior parte de K (de 70% a 75%) deve ser aplicada na época de semeadura e o restante com a adubação de N em cobertura.

## Métodos de aplicação

Como o K é um nutriente relativamente imóvel no solo, seu suprimento para as raízes ocorre principalmente por difusão (BARBER, 1995). Isso significa que, em solos com deficiência de K, a aplicação no sulco de plantio pode ser mais eficiente do que a aplicação a lanço. De acordo com Lopes (1983), a aplicação de K nos solos de Cerrado deve ser feita de duas maneiras complementares: a lanço e com incorporação (para aumentar a saturação de K a 3%) e no sulco (em quantidades de manutenção). Segundo Malavolta (1985), a aplicação no sulco apresenta pouca vantagem em relação à aplicação a lanço se o solo possuir alto teor de K.

## Fontes de potássio

Existem várias fontes de K no mercado (Tabela 7). Porém, as mais comuns são os adubos formulados e o cloreto de potássio. O sulfato de potássio também é eficiente no fornecimento de K, com a vantagem adicional de também fornecer enxofre (S), embora seja mais caro do que o cloreto.

**Tabela 7.** Principais fontes de K e sua solubilidade em água.

| Fertilizante                                                                        | K <sub>2</sub> O (%) | Solubilidade em água (%) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Cloreto de potássio (KCl)                                                           | 60                   | 100                      |
| Sulfato de potássio (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                               | 50                   | 100                      |
| Sulfato de potássio e magnésio (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·MgSO <sub>4</sub> ) | 23                   | 100                      |
| Nitrato de potássio (KNO <sub>3</sub> )                                             | 44                   | 100                      |
| Metafosfato de potássio (KPO <sub>3</sub> )                                         | 40                   | Baixa solubilidade       |

Fonte: Fageria (2009).

## Genótipos/cultivares eficientes

O emprego de cultivares eficientes na utilização de nutrientes é uma estratégia importante para reduzir o custo da produção agrícola, pois resulta em diminuição da quantidade de fertilizante aplicada. No que se

refere ao aspecto prático, a eficiência reflete a habilidade de uma cultivar de produzir bem sob baixo teor de nutrientes no solo. No entanto, segundo Gerloff (1976), sob níveis adequados de nutrientes, os genótipos não eficientes devem produzir aproximadamente o mesmo que os eficientes. Há relatos de diferenças na absorção e utilização de K entre genótipos/cultivares do feijoeiro (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2001, 2008, 2011). A eficiência do uso de K variou de 12,28 mg a 103,93 mg de grãos por mg de K acumulado na parte aérea e nos grãos dependendo do genótipo (Tabela 8). Observa-se, nas Figuras 12 e 13, o crescimento do sistema radicular de cultivares de feijoeiro com 0 e 200 mg de K kg<sup>-1</sup> do solo. Existe variação significativa entre as cultivares no desenvolvimento do sistema radicular, o que pode ser responsável pelas diferenças na absorção e utilização de K.

**Tabela 8.** Eficiência do uso de potássio (K) por genótipos de feijoeiro cultivados em solo de Cerrado.

| <b>Genótipo</b> | <b>Eficiência do uso de K (mg de grãos/mg de K acumulado na parte aérea e nos grãos)<sup>(1)</sup></b> |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Iraí            | 22,45b                                                                                                 |
| Jalo Precoce    | 12,39b                                                                                                 |
| Novo Jalo       | 12,28b                                                                                                 |
| L93300166       | 23,44b                                                                                                 |
| L93300176       | 41,40ab                                                                                                |
| Carioca         | 21,10b                                                                                                 |
| Diamante Negro  | 103,93a                                                                                                |
| Pérola          | 17,51b                                                                                                 |
| Rosina G-2      | 12,19b                                                                                                 |
| Xamego          | 12,27b                                                                                                 |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2001).

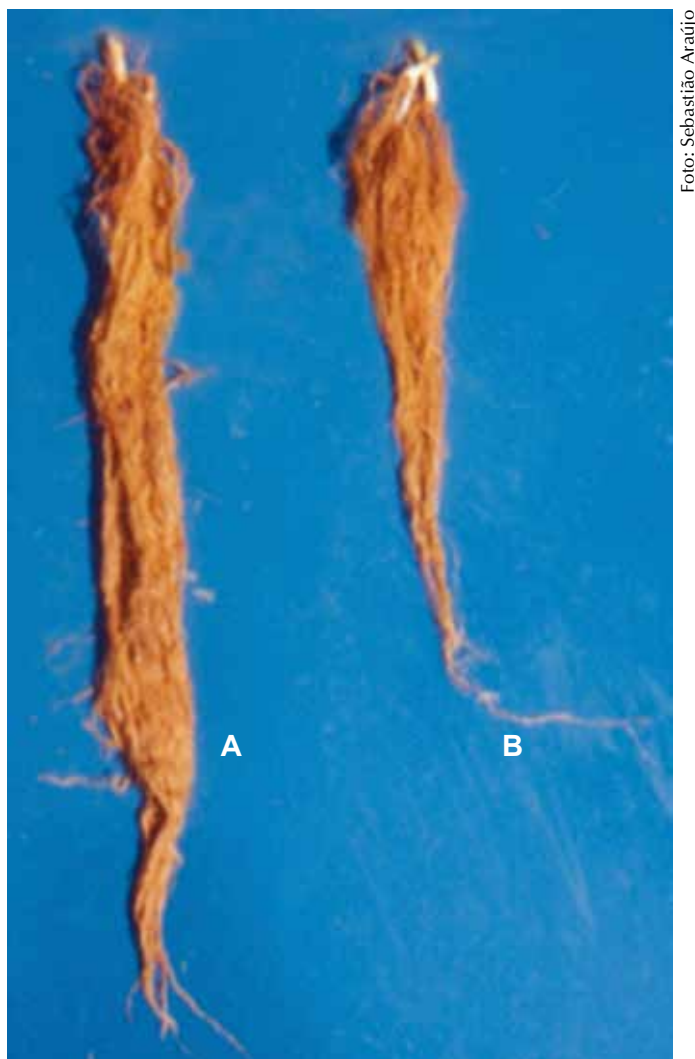


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 12.** Crescimento do sistema radicular de duas cultivares de feijoeiro (IAC Carioca – A – e Goiano Precoce – B) sem aplicação de potássio (K) em solo de Cerrado.

Fonte: Fageria (2009).



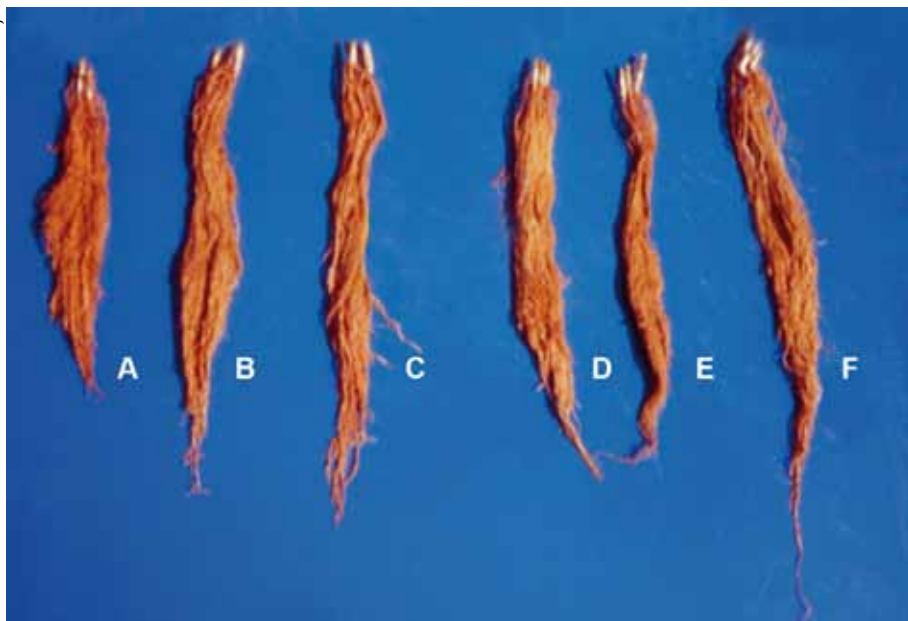


**Figura 13.** Crescimento de seis cultivares de feijoeiro (Aporé – A –, Pérola – B –, IAC Carioca – C –, Carioca – D –, Ouro Negro – E – e Goiano Precoce –F) com aplicação de 200 mg de K kg<sup>-1</sup> de solo.

Fonte: Fageria (2009).

### Incorporação de restos culturais

A incorporação de restos culturais após a colheita permite a reciclagem de uma quantidade substancial de K. Como pode ser visto na Tabela 9, de 70% a 80% do K total absorvido fica na parte aérea de cereais, como trigo e arroz, e de 40% a 50% em leguminosas, como feijão-comum e feijão-caupi. A incorporação de restos culturais é essencial para prolongar o efeito residual de aplicações de K em sistemas intensivos de cultivo em Oxissolos, de acordo com Silva e Ritchey (1982). Os mesmos autores relataram que uma aplicação de 150 kg de K ha<sup>-1</sup> foi suficiente para produzir cinco culturas consecutivas quando a palha foi retornada ao solo. Em outros trabalhos em Oxissolo da Amazônia brasileira, Smyth et al. (1987) e Cox e Uribe (1992) também mostraram que houve suprimento suficiente de K em sistema de rotação envolvendo sete culturas quando os restos culturais foram incorporados ao solo.

**Tabela 9.** Distribuição de potássio (K) nas partes da planta de quatro culturas.

| <b>Cultura</b> | <b>Raíz (%)</b> | <b>Parte aérea (%)</b> | <b>Grão (%)</b> | <b>Casca da vagem (%)</b> | <b>Arista (%)</b> |
|----------------|-----------------|------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|
| Arroz          | 4               | 78                     | 18              | -                         | -                 |
| Trigo          | 2               | 72                     | 11              | -                         | 15                |
| Feijão-comum   | 6               | 43                     | 31              | 20                        | -                 |
| Feijão-caupi   | 5               | 49                     | 36              | 10                        | -                 |

Fonte: Fageria et al. (1999).

## Umidade do solo

A resposta das culturas à aplicação de K é afetada pela interação entre o modo de aplicação do fertilizante e a umidade do solo. O baixo teor de umidade no solo diminui a absorção de K pelas raízes da planta por causa da diminuição da taxa de difusão desse nutriente (BARBER, 1995). Kaspar et al. (1989) relataram que o crescimento da soja e a eficiência do uso de K diminuíram com a redução da umidade do solo na camada adubada, embora houvesse água disponível em maiores profundidades. Schaff e Skogley (1982) observaram aumento na taxa de difusão de K de 2,8 vezes, em média, quando a umidade do solo aumentou de 10% para 28%. Dunham e Nye (1976) notaram um aumento de três a quatro vezes na difusão de K quando o potencial de água do solo aumentou de -350 kPa para -10 kPa. A taxa de crescimento das raízes também é afetada pela umidade do solo, o que, por sua vez, afeta a absorção de K (MACKAY; BARBER, 1985).

## Calagem em solos ácidos

A prática da calagem em solos ácidos não só diminui a toxicidade de alumínio (Al), melhorando o crescimento das culturas, como também aumenta a retenção de K, evitando sua perda por lixiviação. Além disso, a calagem aumenta a CTC do solo, pois favorece a retenção do K com a substituição do Al pelo Ca nos sítios de troca, permitindo melhor competição do K por esses sítios de troca (GOEDERT et al., 1975).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O nutriente K é importante para as plantas em vários processos fisiológicos e bioquímicos que determinam a produtividade das culturas.

Na cultura do feijoeiro, o nível adequado de K no solo diminui o risco de doenças, especialmente as associadas com bactérias e fungos. O K é móvel na planta; portanto, sua deficiência primeiramente aparece nas folhas mais velhas. A resposta da cultura do feijoeiro ao K não é tão marcante como aos nutrientes N e P graças ao seu alto teor no solo e à possibilidade de liberação da fração de K não trocável para a solução do solo. Entretanto, após o N, o K é o nutriente acumulado pelo feijoeiro em maior quantidade, especialmente pelas cultivares modernas. Portanto, com cultivos sucessivos ou intensivos, existe possibilidade de ocorrer deficiência desse elemento se não forem tomadas providências apropriadas para a sua reposição. Além de ser absorvido pela cultura, o K pode ser perdido por lixiviação e erosão do solo. Uma parte do K pode ser fixada no solo, dependendo da sua mineralogia e textura. Na cultura do feijoeiro, de 40% a 45% do K acumulado na planta fica na palha. Portanto, a incorporação de restos culturais pode ajudar na reciclagem desse elemento.

Na colheita, para uma produção em torno de 3.000 kg de grãos  $\text{ha}^{-1}$ , o teor adequado de K na palha situa-se em torno de 16 g  $\text{kg}^{-1}$  ou 1,6% e, nos grãos, em torno de 1,7 g  $\text{kg}^{-1}$  ou 0,17%. Para produzir uma tonelada de grãos, a cultura do feijoeiro acumula K na faixa de 27 kg a 32 kg na palha e nos grãos, dependendo da produtividade e da cultivar. Aproximadamente 40% a 45% do K aplicado são recuperados pela cultura, mais ou menos a mesma proporção do N. Na média, a eficiência de utilização do K (kg de grãos produzido por kg de K acumulado) é menor do que a do N e a do P.

A resposta da cultura do feijoeiro à aplicação de K depende do manejo da água e do equilíbrio adequado dos outros nutrientes, principalmente do N e do P. As recomendações de adubação potássica são feitas com base na análise do solo. Em média, quando o teor de K no solo é maior do que 50 mg  $\text{kg}^{-1}$  do solo (50 ppm), extraído com o extrator Mehlich 1 (0,05N HCl + 0,025N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), a cultura do feijoeiro não responde à aplicação de K. Nessa situação, uma aplicação de 60 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$  a 80 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$  é recomendada. Entretanto, quando o teor de K é menor do que 50 mg  $\text{kg}^{-1}$  do solo, recomenda-se aplicar de 100 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$  a 120 kg de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$ . Geralmente, o K é aplicado na época da semeadura. No entanto, em solo arenoso, uma parte desse nutriente pode ser aplicada em cobertura, junto com o N, para evitar a lixiviação e aumentar a eficiência de absorção.

## Capítulo 7

# **Cálcio e magnésio**

## INTRODUÇÃO

O cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) participam de vários processos fisiológicos e bioquímicos das plantas. São nutrientes importantes no processo fotossintético e, conseqüentemente, no aumento da produtividade. Na Tabela 1, são apresentadas as principais propriedades químicas de solos de Cerrado e de várzeas, entre as quais estão os teores de Ca e Mg. A deficiência desses nutrientes é comum em solos ácidos, como os de Cerrado, por causa do alto grau de intemperismo desses solos (FAGERIA, 1989). Em solo de várzea, os teores desses elementos são adequados no início do cultivo, mas diminuem significativamente após dois ou três cultivos (FAGERIA et al., 2003b).

Em comparação com cereais, como o arroz, o feijão necessita de teores mais altos de Ca e Mg no solo para ter alta produtividade (FAGERIA 2001a, 2001b; FAGERIA; BALIGAR, 2001). Observa-se, na Tabela 2, que, com o aumento dos teores de Ca e Mg no solo, aumentou a produtividade

**Tabela 1.** Principais propriedades químicas de solos de Cerrado e de várzeas.

| Propriedade                                         | Cerrado <sup>(1)</sup> | Várzea <sup>(2)</sup> |
|-----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| pH (em H <sub>2</sub> )                             | 5,2                    | 5,3                   |
| Cálcio (Ca) (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )   | 0,64                   | 4,9                   |
| Magnésio (Mg) (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 0,58                   | 3,1                   |
| Alumínio (Al) (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 0,64                   | 1,3                   |
| Fósforo (P) (mg kg <sup>-1</sup> )                  | 1,2                    | 16,0                  |
| Potássio (K) (mg kg <sup>-1</sup> )                 | 47,2                   | 92,0                  |
| Cobre (Cu) (mg kg <sup>-1</sup> )                   | 1,3                    | 2,2                   |
| Zinco (Zn) (mg kg <sup>-1</sup> )                   | 1,0                    | 2,4                   |
| Ferro (Fe) (mg kg <sup>-1</sup> )                   | 116                    | 303                   |
| Manganês (Mn) (mg kg <sup>-1</sup> )                | 12                     | 59                    |
| Matéria orgânica (g kg <sup>-1</sup> )              | 15                     | 31                    |
| Saturação por bases                                 | 17                     | 50                    |

<sup>(1)</sup>Os valores são médias de 200 amostras do solo coletadas em seis estados na região do Cerrado.

<sup>(2)</sup>Os valores são médias de 55 amostras do solo coletadas em oito estados em solos de várzea.

Fonte: Fageria e Stone (1999).

do feijoeiro. Quando o teor de Ca aumentou de  $1,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para  $3,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e o de Mg aumentou de  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para  $1,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , a produtividade aumentou em 19%. Da mesma maneira, quando o teor de Ca aumentou de  $1,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para  $3,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , a produtividade aumentou em 24%<sup>1</sup>. O aumento nos teores de Ca e Mg no solo não somente fornece esses nutrientes para a planta, mas também reduz a acidez do solo e aumenta a saturação por bases (Tabela 3). Este Capítulo tem como objetivo reunir informações sobre a nutrição de Ca e Mg para o

**Tabela 2.** Influência do cálcio (Ca) e do magnésio (Mg) na produtividade do feijoeiro em solo de Cerrado.

| Teor de Ca<br>( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | Teor de Mg<br>( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | Produtividade de grãos<br>( $\text{kg ha}^{-1}$ ) |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1,6                                               | 0,5                                               | 2.739,3                                           |
| 3,2                                               | 1,2                                               | 3.259,3                                           |
| 3,8                                               | 1,2                                               | 3.386,0                                           |

Fonte: adaptado de Fageria (2006b).

**Tabela 3.** Influência do cálcio (Ca) e do magnésio (Mg) na acidez e saturação por bases em solo de Cerrado.

| Teor de Ca<br>( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | Teor de Mg<br>( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | H + Al<br>( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) | Saturação por bases<br>(%) |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| 0,90                                              | 1,00                                              | 10,20                                         | 22                         |
| 5,60                                              | 2,80                                              | 4,50                                          | 68                         |
| 7,40                                              | 2,80                                              | 2,38                                          | 83                         |
| 7,80                                              | 2,30                                              | 1,70                                          | 90                         |
| 8,00                                              | 2,20                                              | 1,20                                          | 90                         |
| 9,20                                              | 2,10                                              | 0,80                                          | 94                         |
| $R^{2(1)}$                                        |                                                   | 0,99**                                        | 0,99**                     |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

<sup>1</sup> Fageria e Barbosa Filho (2008), Fageria e Stone (2004) e Fageria et al. (2007) relataram o aumento na produtividade do feijoeiro com o aumento dos teores de Ca e Mg em solos de Cerrado.

feijoeiro cultivado em solos de Cerrado e várzea, o que pode ajudar a aumentar a eficiência do uso desses nutrientes e melhorar a produtividade.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

As principais fontes de adição de Ca e Mg no solo são o calcário dolomítico e os adubos químicos. As maiores perdas desses dois elementos no sistema solo-planta se dão por absorção pelas plantas, lixiviação e erosão. As formas de Ca e Mg no solo podem ser classificadas como “não trocáveis” (ou formas minerais), “trocáveis” e “na solução do solo”. Todas essas formas estão em equilíbrio no solo. O Ca e o Mg na solução do solo ocorrem nas formas catiônicas de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , que são as formas absorvidas pelas plantas. Suas taxas de absorção são mais lentas do que as de cátions monovalentes, como  $\text{K}^+$  e  $\text{NH}_4^+$  (FAGERIA et al., 1999). As deficiências de Ca e Mg podem ocorrer em solos arenosos ou em solos ácidos altamente intemperizados de regiões úmidas. Quando o pH do solo é baixo, é necessária maior concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução do solo para reduzir a toxidez de íons  $\text{H}^+$ . A deficiência de  $\text{Mg}^{2+}$  pode ocorrer devido à alta relação K/Mg (HABY et al., 1990).

De acordo com Barber (1995), o Ca e o Mg podem ser fornecidos às plantas em quantidades suficientes por fluxo de massa. Muitos solos ácidos da América do Sul e da África Ocidental são deficientes em Ca disponível para as plantas. Esses solos geralmente necessitam de calagem para aumentar o pH e o suprimento de Ca e Mg para a produção das culturas (FAGERIA et al., 2008a). Ritchey et al. (1982) relataram deficiência de Ca em solo de Cerrado do Brasil com teores menores do que  $0,02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . A adsorção de Ca e Mg é incrementada à medida que aumenta o pH, especialmente em solos ricos em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). A elevação do pH causa aumento de cátions divalentes hidrolisados e da carga negativa do solo, fornecendo um número maior de sítios trocáveis com maior afinidade por cátions divalentes. Em solos com pH menor do que 6,0, a maior parte do Ca e do Mg absorvidos permanece na forma trocável, mas, com o aumento do pH, mais cátions divalentes tornam-se adsorvidos e deixam de ser trocáveis (CHAN et al., 1979).

## FUNÇÕES E DEFICIÊNCIA

O Ca é um nutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, cujas funções podem ser assim resumidas (FAGERIA et al., 1999):

1) estimula o desenvolvimento do sistema radicular; 2) faz parte das paredes das células e fortalece a estrutura da planta; 3) reduz a acidez do solo e, dessa maneira, reduz a toxicidade de Al e manganês (Mn) em solos ácidos; 4) ajuda na redução de nitratos na planta e ativa vários sistemas de enzimas para neutralizar os ácidos orgânicos da planta; 5) regula a pressão osmótica das células, mantendo a turgescência; 6) mantém a estrutura de membranas como membrana nuclear, plasmalema, mitocôndria; e 7) ajuda a mediar o transporte de íons.

O Mg também exerce papel importante no crescimento e desenvolvimento da planta e tem as seguintes funções: 1) faz parte da molécula de clorofila (essa é considerada uma das suas funções principais); 2) é componente de ribossomos e cromossomos (SHUMAN, 1994); 3) é responsável pela regulação do pH nas células e pelo equilíbrio de cátions e ânions; e 4) influencia a atividade de numerosas enzimas nas plantas. Se os processos normais metabólicos são mantidos, é necessário um balanço entre Ca e Mg.

O Ca é um nutriente imóvel na planta; portanto, os sintomas de deficiência aparecem nas folhas mais novas (Figuras 1 e 2). As folhas terminais morrem conforme a deficiência se acentua, causando severo atrofiamento das plantas. À medida que a deficiência persiste, as folhas mais velhas



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 1.** Planta de feijoeiro com deficiência de cálcio (Ca).

Fonte: Fageria et al. (1996).



desenvolvem uma necrose marrom-avermelhada nas nervuras. No caso do Mg, a deficiência inicia-se nas folhas mais velhas, com coloração amarelada; mais tarde, a porção entre as nervuras da folha torna-se alaranjada. A deficiência de Mg reduz o crescimento da planta significativamente (Figura 3). Quando a deficiência se espalha por toda a folha, ela fica

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 2.** Folhas de feijoeiro com deficiência de cálcio (Ca).

Fonte: Fageria et al. (1996).

Foto: Sebastião Araújo

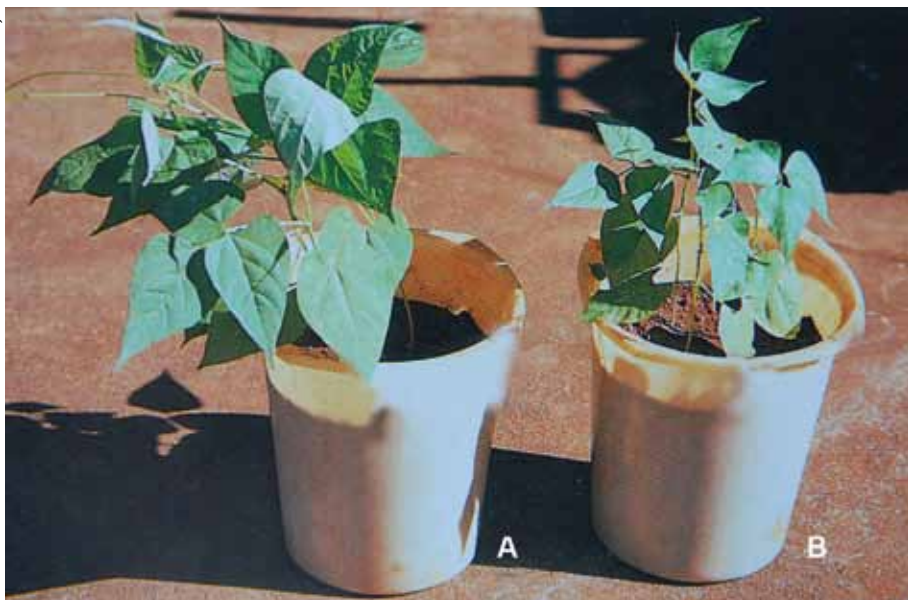


**Figura 3.** Planta de feijoeiro normal (A) e com deficiência (B) de magnésio (Mg).

Fonte: Fageria et al. (1996).

completamente seca. Os sintomas de deficiência de Ca e Mg na planta do feijoeiro, com fotografias coloridas, podem ser vistos em Fageria et al. (1996), Rosolem (1996), Wallace (1961) e Wilcox e Fageria (1976).

## TEOR E ACUMULAÇÃO NA PLANTA

O teor de Ca na planta (concentração por unidade de matéria seca) é um importante parâmetro na interpretação dos resultados da análise foliar. As concentrações dos nutrientes na planta, inclusive do Ca e Mg, são bastante estáveis sob diferentes agroecossistemas (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2011). Além disso, o Ca sob altas concentrações é um nutriente mineral não tóxico para a planta e é muito efetivo na desintoxicação de altas concentrações de outros elementos (MARSCHNER, 1995). Em condições normais de crescimento, os dois fatores mais importantes que devem ser levados em consideração na interpretação dos resultados da análise da planta são a idade e a parte da planta utilizada na análise (FAGERIA, 2009). Na Tabela 4, são apresentados resultados de análise

**Tabela 4.** Teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro durante o ciclo da cultura. Os valores são médias de 2 anos de ensaios de campo.

| Idade da planta (em dias)                                                                                          | Teor de Ca (g kg <sup>-1</sup> ) | Teor de Mg (g kg <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 15                                                                                                                 | 13,3                             | 4,6                              |
| 29                                                                                                                 | 20,4                             | 4,4                              |
| 43                                                                                                                 | 21,8                             | 4,8                              |
| 62                                                                                                                 | 17,2                             | 4,6                              |
| 84                                                                                                                 | 12,5                             | 4,3                              |
| 96 (colheita), na parte aérea                                                                                      | 10,6                             | 5,0                              |
| 96 (colheita), nos grãos                                                                                           | 2,9                              | 2,3                              |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                        |                                  |                                  |
| Idade (X) vs. Teor de Ca na parte aérea (Y) = 8,7934 + 0,4741 X - 0,0048 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,8392* |                                  |                                  |
| Idade (X) vs. Teor de Mg na parte aérea (Y) = 4,5011 + 0,0021 X, R <sup>2</sup> = 0,0676 <sup>ns</sup>             |                                  |                                  |

\* Significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

de Ca e Mg na planta do feijoeiro durante o ciclo da cultura. As concentrações de Ca aumentaram significativamente e de maneira quadrática com o avanço da idade da planta. Com base na equação de regressão, o teor de Ca máximo foi obtido aos 49 dias de idade da planta e depois diminuiu. Essa mudança ocorre para quase todos os nutrientes e mostra a importância da análise da planta durante os diferentes estádios do crescimento. A diminuição do teor de Ca com o avanço da idade está relacionada com o aumento da produção de matéria seca da parte aérea (é o chamado “efeito de diluição”) (FAGERIA, 2009). Não houve efeito significativo no teor de Mg na planta com o avanço da idade. Na colheita, as concentrações de Ca e Mg foram menores nos grãos do que na palha. A concentração de Ca nos grãos foi maior do que a de Mg. O teor de Ca nas plantas monocotiledôneas é geralmente baixo em comparação com o teor nas dicotiledôneas.

Além da concentração do elemento, é importante determinar a sua acumulação na planta durante o ciclo da cultura. Com o conhecimento da acumulação, é possível determinar a quantidade de nutrientes necessária para fazer a reposição no solo. A acumulação é dada por:

*Produtividade da cultura x Concentração do nutriente*

Isso significa que a quantidade de nutriente acumulado depende do nível de produtividade, levando-se em consideração a palha e os grãos. Na Tabela 5, encontram-se os dados de acumulação de Ca e Mg na cultura do feijoeiro ao longo de diferentes estádios de crescimento.

A acumulação de Ca e Mg foi significativamente influenciada pela idade da planta, sofrendo um aumento exponencial quadrático. Com base na equação de regressão, a máxima acumulação de Ca e Mg ocorreu aos 74 e 70 dias após a semeadura, respectivamente. Na colheita, tanto a acumulação de Ca como a de Mg foi menor nos grãos do que na parte aérea. Isso significa que, se os restos culturais forem incorporados ao solo, podem fornecer quantidade substancial de Ca e Mg. A acumulação de Ca e Mg seguiu o padrão de acumulação da matéria seca da parte aérea (FAGERIA, 2009). A diminuição na acumulação de Ca e Mg no final do ciclo da cultura está associada com a translocação desses nutrientes para os grãos e com a queda de folhas nessa fase de desenvolvimento das plantas.

**Tabela 5.** Acumulação de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro durante o ciclo da cultura.

| Idade (dia)                                                                                                                      | Acumulação de Ca<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Acumulação de Mg<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 15                                                                                                                               | 1,43                                       | 0,49                                       |
| 29                                                                                                                               | 6,82                                       | 1,46                                       |
| 43                                                                                                                               | 16,71                                      | 3,67                                       |
| 62                                                                                                                               | 34,47                                      | 9,32                                       |
| 84                                                                                                                               | 50,00                                      | 12,85                                      |
| 96 (colheita), na parte aérea                                                                                                    | 15,80                                      | 7,15                                       |
| 96 (colheita), nos grãos                                                                                                         | 5,65                                       | 4,39                                       |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                                      |                                            |                                            |
| Idade (X) vs. Acumulação de Ca na parte aérea (Y) = 0,1696 exp. (0,1578 X – 0,00112 X <sup>2</sup> ), R <sup>2</sup> = 9.712**   |                                            |                                            |
| Idade (X) vs. Acumulação de Mg na parte aérea (Y) = 0,0785 exp. (0,1273 X – 0,000855 X <sup>2</sup> ), R <sup>2</sup> = 0,9801** |                                            |                                            |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

## EFICIÊNCIA DO USO DOS NUTRIENTES PARA A PRODUTIVIDADE DA PARTE AÉREA E DOS GRÃOS E ÍNDICE DE COLHEITA DE CÁLCIO E MAGNÉSIO

A eficiência do uso de Ca e Mg pode ser definida como a produtividade da massa da matéria seca da parte aérea e de grãos por unidade de Ca e Mg acumulados. As eficiências de uso de Ca e Mg são apresentadas na Tabela 6. Na parte aérea, enquanto a eficiência de uso de Ca diminuiu significativamente e de maneira quadrática com o avanço da idade da planta, a eficiência do uso de Mg não sofreu efeito significativo da idade da planta. A eficiência de uso de Mg foi maior do que a de Ca tanto na parte aérea como nos grãos do feijoeiro. A baixa eficiência do Ca está associada ao fato de que seu alto teor na parte aérea e nos grãos é maior do que o de Mg. Os índices de colheita de Ca e Mg variaram de cultura para cultura (Tabela 7). Tanto o índice de colheita de Ca como o de Mg foram maiores em leguminosas do que em cereais.

**Tabela 6.** Eficiência dos usos de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na produção de massa da matéria seca da parte aérea e nos grãos na cultura do feijoeiro.

| Idade (dia)    | Eficiência de Ca (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> | Eficiência de Mg (kg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup> |
|----------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 15             | 107                                                    | 224                                                    |
| 29             | 49                                                     | 230                                                    |
| 43             | 47                                                     | 212                                                    |
| 62             | 59                                                     | 219                                                    |
| 84             | 72                                                     | 236                                                    |
| 96             | 99                                                     | 203                                                    |
| 96 (nos grãos) | 345                                                    | 434                                                    |
| Regressão      | Quadrática                                             | Quadrática                                             |
| $R^{2(3)}$     | 0,82*                                                  | 0,10 <sup>ns</sup>                                     |

<sup>(1)</sup> Eficiência do uso de Ca = Produtividade de massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos/Acumulação de Ca na parte aérea ou nos grãos.

<sup>(2)</sup> Eficiência do uso de Mg = Produtividade de massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos/Acumulação de Mg na parte aérea ou nos grãos.

<sup>(3)</sup> Coeficiente de determinação.

\* Significativo a 5% de probabilidade

<sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: adaptado de Fageria (2008a).

**Tabela 7.** Índices de colheita de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas principais culturas.

| Cultura               | Índice de colheita de Ca (%) <sup>(1)</sup> | Índice de colheita de Mg (%) <sup>(2)</sup> |
|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Arroz de terras altas | 7                                           | 25                                          |
| Arroz irrigado        | 16                                          | 29                                          |
| Milho                 | 19                                          | 31                                          |
| Feijão                | 19                                          | 46                                          |
| Soja                  | 23                                          | 42                                          |

<sup>(1)</sup> Índice de colheita de Ca = Acumulação de Ca nos grãos/Acumulação de Ca na parte aérea e nos grãos.

<sup>(2)</sup> Índice de colheita de Mg = Acumulação de Mg nos grãos/Acumulação de Mg na parte aérea e nos grãos.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

INTERAÇÕES COM OUTROS NUTRIENTES

O conhecimento das interações com outros nutrientes essenciais é importante na determinação da produtividade das culturas. Se houve interação positiva, a produtividade pode aumentar e vice-versa. Observa-se, na Tabela 8, a influência de doses de Ca e Mg na absorção de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na parte aérea do feijoeiro. Houve aumento significativo na absorção desses nutrientes com o aumento dos teores de Ca e Mg no solo. Isso significa que o Ca e o Mg possuem interação positiva com esses nutrientes.

**Tabela 8.** Influência do cálcio (Ca) e do magnésio (Mg) na absorção de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na parte aérea do feijoeiro.

| Teor de Ca no solo<br>(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )                                                     | Teor de Mg no solo<br>(cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | N na planta<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | P na planta<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | K na planta<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1,17                                                                                                            | 0,33                                                        | 35                                    | 3,0                                   | 38                                    |
| 1,60                                                                                                            | 1,09                                                        | 43                                    | 3,3                                   | 47                                    |
| 209                                                                                                             | 1,53                                                        | 44                                    | 3,4                                   | 49                                    |
| 2,52                                                                                                            | 1,78                                                        | 50                                    | 3,7                                   | 55                                    |
| 2,91                                                                                                            | 2,35                                                        | 38                                    | 3,9                                   | 56                                    |
| Análise de regressão                                                                                            |                                                             |                                       |                                       |                                       |
| Teor de Ca (X) vs. Absorção de N (Y) = -13,1806 + 55,8772 X - 12,9383 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,7598* |                                                             |                                       |                                       |                                       |
| Teor de Ca (X) vs. Absorção de P (Y) = 2,4386 + 5.006 X, R <sup>2</sup> = 0,9940**                              |                                                             |                                       |                                       |                                       |
| Teor de Ca (X) vs. Absorção de K (Y) = 13,2938 + 26,3573 X - 4,0097 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,9887**  |                                                             |                                       |                                       |                                       |
| Teor de Mg (X) vs. Absorção de N (Y) = 26,5362 + 26,5287 X - 8,9631 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,7630*   |                                                             |                                       |                                       |                                       |
| Teor de Mg (X) vs. Absorção de P (Y) = 2,8187 + 0,4528 X, R <sup>2</sup> = 0,9604**                             |                                                             |                                       |                                       |                                       |
| Teor de Mg (X) vs. Absorção de K (Y) = 35,8943 + 9,2553 X, R <sup>2</sup> = 0,9389**                            |                                                             |                                       |                                       |                                       |

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade

Fonte: adaptado de Fageria et al. (1991).

ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO

A estratégia de manejo apropriado de Ca e Mg na produção do feijoeiro envolve o uso de doses adequadas, fontes e métodos apropriados,

calagem em solos ácidos e semeadura de cultivares/genótipos eficientes na absorção e utilização de Ca e Mg.

## Doses adequadas

As doses adequadas de Ca e Mg (que podem ser aplicadas na forma de calcário dolomítico) devem ser decididas com base na curva de calibração da cultura à aplicação de nutrientes. É possível definir a dose adequada de calcário e, ao mesmo tempo, os teores adequados de Ca e Mg no solo com a análise do solo. Na Tabela 9, é apresentada a resposta do feijoeiro à aplicação de calcário dolomítico em solo de Cerrado. São também apresentadas as relações entre os teores de Ca e Mg no solo e a produtividade de grãos. Com base nas equações de regressão, foram calculados os valores adequados para a obtenção da produção máxima.

**Tabela 9.** Relação entre doses de calcário, teor de Ca e Mg (X) e produtividade de grãos (Y) do feijoeiro em solo de Cerrado.

| Dose de calcário e teores de Ca e Mg     | Equação de regressão                          | R <sup>2</sup> | Valor adequado para produtividade máxima |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------|------------------------------------------|
| Dose (t ha <sup>-1</sup> )               | $Y = 1.402,8930 + 76,3701 X - 3,8612 X^2$     | 0,6124**       | 9                                        |
| Ca (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | $Y = -1.648,45 + 237,4306 X - 4,1395 X^2$     | 0,8003**       | 29                                       |
| Mg (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | $Y = -1.6209,33 + 2844,5050 X - 112,8286 X^2$ | 0,4357*        | 13                                       |

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2001a, 2001b).

## Fontes e métodos de aplicação

Como a maioria dos solos deficientes em Ca é ácida, a calagem deve ser usada para melhorar os teores de Ca e Mg do solo e, ao mesmo tempo, reduzir sua acidez. Para isso, o calcário dolomítico é a melhor fonte de Ca e Mg; também pode ser utilizado o gesso agrícola (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Além de fornecer P, os fosfatos simples, triplo e de rocha funcionam como fonte de Ca. No caso do uso do calcário dolomítico, o melhor método é aplicar a lanço e incorporar com grade. A aplicação deve ser bem antes da semeadura da cultura para permitir que ocorra a reação no solo. Várias fontes de Ca e Mg são apresentadas na Tabela 10.

**Tabela 10.** Fontes de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e suas características químicas.

| Nome comum                                                                                                                         | Teor de Ca ou Mg                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Calcário dolomítico [ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ]                                                                               | 180 a 210 g de Ca $\text{kg}^{-1}$<br>78 a 120 g de Mg $\text{kg}^{-1}$ |
| Calcário calcítico ( $\text{CaCO}_3$ )                                                                                             | 284 a 320 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                      |
| Calcário magnesiano ( $\text{MgCO}_3$ )                                                                                            | 36 a 72 g de Mg $\text{kg}^{-1}$                                        |
| Óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ )                                                                                                   | 714 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                            |
| Hidróxido de cálcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]                                                                                   | 461 a 540 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                      |
| Superfósforo simples [ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] | 180 a 200 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                      |
| Gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )                                                                       | 230 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                            |
| Superfósforo triplo [ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ]                                                                       | 130 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                            |
| Nitrato de cálcio [ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ]                                                                                   | 190 g de Ca $\text{kg}^{-1}$                                            |
| Óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ )                                                                                                 | 600 g de Mg $\text{kg}^{-1}$                                            |
| Sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )                                                                  | 95 g de Mg $\text{kg}^{-1}$                                             |
| Termofósforo [ $3\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot 3(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ ]                                             | 200 g de Ca $\text{kg}^{-1}$<br>66 g de Mg $\text{kg}^{-1}$             |
| Serpentina [ $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ]                                                                  | 260 g de Mg $\text{kg}^{-1}$                                            |

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

## Uso de calagem em solos ácidos

A calagem é uma prática importante para reduzir a acidez e aumentar os teores de Ca e Mg no solo. Verifica-se, na Tabela 11, o efeito da calagem na mudança das propriedades químicas do solo de Cerrado e no aumento da produtividade do feijoeiro. Os valores das propriedades químicas foram maiores na camada superficial (de 0 a 10 cm) do que na subsuperficial (de 10 cm a 20 cm).

Foram estabelecidos valores adequados de algumas propriedades químicas do solo para a cultura do feijoeiro no sistema de plantio direto em solo de Cerrado considerando a média das duas profundidades (Tabela 12).



**Tabela 11.** Propriedades químicas do solo após a colheita de três safras de feijão em tratamentos com calcário. Os valores são médias de três cultivos no sistema de plantio direto.

| Propriedade do solo                                         | Dose de calcário (t ha <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |        |        | Teste F |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|--------|---------|
|                                                             | 0                                                     | 12     | 24     |         |
| 0 a 10 cm de profundidade                                   |                                                       |        |        |         |
| pH                                                          | 5,4c                                                  | 6,8b   | 7,2a   | **      |
| Saturação por bases                                         | 30,3c                                                 | 73,9b  | 83,6a  | **      |
| Hidrogênio + alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 6,6a                                                  | 2,5b   | 1,5c   | **      |
| Saturação por acidez (%)                                    | 69,8a                                                 | 26,9b  | 15,7c  | **      |
| Cálcio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )                | 1,8c                                                  | 3,9b   | 4,5a   | **      |
| Magnésio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )              | 0,5b                                                  | 1,3a   | 1,3a   | **      |
| CTC <sup>(2)</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )    | 9,2a                                                  | 7,9b   | 7,5c   | **      |
| 10 cm a 20 cm de profundidade                               |                                                       |        |        |         |
| pH                                                          | 5,1c                                                  | 6,0b   | 6,4a   | **      |
| Saturação por bases                                         | 22,1c                                                 | 46,4b  | 56,0a  | **      |
| Hidrogênio + alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | 7,0a                                                  | 3,8b   | 2,9c   | **      |
| Saturação por acidez (%)                                    | 78,5a                                                 | 50,9b  | 39,1c  | **      |
| Cálcio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )                | 1,3c                                                  | 2,7b   | 3,5a   | **      |
| Magnésio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )              | 0,4c                                                  | 1,0b   | 1,1a   | **      |
| CTC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )                   | 8,7a                                                  | 8,3b   | 8,1b   | **      |
| Produtividade de grãos (kg ha <sup>-1</sup> )               | 2.260b                                                | 3.060a | 2.979a | **      |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, para cada profundidade do solo, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

<sup>(2)</sup> Capacidade de troca catiônica.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Stone (2004).

**Tabela 12.** Relação entre propriedades químicas do solo (X) e produtividade de grãos do feijoeiro (Y). Os valores são médias de duas profundidades do solo (de 0 a 10 cm e de 10 cm a 20 cm) e 3 anos de cultivo.

| Propriedade do solo                          | Equação de regressão                                | R <sup>2</sup> | VPM <sup>(1)</sup> |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|--------------------|
| pH em H <sub>2</sub> O                       | Y = -17.689,98 + 6.327,22 X - 482,58 X <sup>2</sup> | 0,57**         | 6,6                |
| Cálcio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | Y = 856,37 + 1.093,47 X - 135,88 X <sup>2</sup>     | 0,57**         | 4,0                |

Continua...

**Tabela 12.** Continuação.

| Propriedade do solo                                         | Equação de regressão                     | R <sup>2</sup> | VPM <sup>(1)</sup> |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------|--------------------|
| Magnésio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )              | $Y = 1.747,50 + 1.034,21 X$              | 0,60**         | 1,2                |
| Hidrogênio + alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | $Y = 2.782,09 + 200,75 X - 40,97 X^2$    | 0,53**         | 2,4                |
| Saturação por acidez (%)                                    | $Y = 2.503,67 + 31,52 X - 0,46 X^2$      | 0,56**         | 33,9               |
| CTC <sup>(2)</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )    | $Y = -29,63 + 8.179,41 X - 512,90 X^2$   | 0,32**         | 7,9                |
| Saturação por bases (%)                                     | $Y = 1.049,90 + 57,40 X - 0,41 X^2$      | 0,55**         | 69                 |
| Saturação por cálcio (%)                                    | $Y = 927,83 + 90,43 X - 0,96 X^2$        | 0,55**         | 47                 |
| Saturação por magnésio (%)                                  | $Y = 1.812,42 + 77,97 X$                 | 0,57**         | 15                 |
| Saturação por potássio (%)                                  | $Y = -373,60 + 1.908,54 X - 225,13 X^2$  | 0,32**         | 4                  |
| Relação cálcio/magnésio                                     | $Y = 7.861,13 - 2.476,73 X + 269,88 X^2$ | 0,28**         | 5                  |
| Relação cálcio/potássio                                     | $Y = 121,39 + 310,99 X - 8,11 X^2$       | 0,57**         | 19                 |
| Relação magnésio/potássio                                   | $Y = 917,41 + 635,05 X - 47,45 X^2$      | 0,53**         | 7                  |

<sup>(1)</sup>VPM = Valores para produção máxima.

<sup>(2)</sup>Capacidade de troca catiônica.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Stone (2004).

## Uso de cultivares eficientes

Como a absorção, o transporte e a redistribuição de nutrientes são geneticamente controlados, existe a possibilidade de melhorar e/ou selecionar cultivares mais eficientes quanto ao uso de nutrientes, inclusive de Ca e Mg (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2011; GABLEMAN; GERLOFF, 1983). A escolha de genótipos eficientes no uso de Ca e Mg na cultura do feijoeiro é de expressiva importância, pois os solos da fronteira agrícola onde o feijoeiro é cultivado são, em sua maioria, deficientes em Ca e Mg (FAGERIA; BALIGAR, 2008). A diferença entre genótipos em relação à absorção e utilização de Ca foi relatada para as culturas anuais (CLARK, 1984). O uso de cultivares eficientes pode ser uma solução complementar para aumentar a eficiência de utilização de Ca e Mg.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fornecimento adequado dos nutrientes essenciais, como Ca e Mg, é um dos fatores mais importantes para a obtenção de altas produtividades. Considerando que a aplicação de fertilizantes responde por cerca de 40% do total dos custos da produção em agricultura com alta tecnologia, é imperativo que os fertilizantes ou nutrientes sejam utilizados de modo eficiente. A estratégia do manejo dos nutrientes deve ser agrônômica, econômica e ecologicamente adequada para que se obtenham os resultados desejáveis. Algumas estratégias, tais como o uso de fontes adequadas, a escolha das melhores épocas e métodos de aplicação e o uso de cultivares eficientes, aumentam a eficiência nutricional e reduzem os custos de produção.

A cultura do feijoeiro necessita de maiores quantidades de Ca e Mg em comparação com outras culturas, como arroz, trigo e cevada. Portanto, a deficiência desses nutrientes para o feijoeiro em solos ácidos, como os de Cerrado e de várzea, é comum. O Ca e o Mg são absorvidos pela planta na forma de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , respectivamente; o nível adequado de  $\text{Ca}^{2+}$  para a cultura do feijoeiro é maior do que  $2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo, e o de  $\text{Mg}^{2+}$  é em torno de  $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de solo. Entretanto, para aumentar ou sustentar a produtividade, deve-se levar em consideração a necessidade desses elementos no sistema de rotação com soja, milho e arroz. Do ponto de vista econômico, o calcário dolomítico é a melhor fonte de Ca e Mg para solos ácidos do Cerrado e de várzea. Às vezes, um dado solo possui alto teor de Ca, mas baixo teor de Mg. Nessa situação, o Mg pode ser fornecido como sulfato de magnésio. Ambos os nutrientes são transportados para a superfície das raízes por fluxo de massa, mas a interceptação radicular também pode fornecer esses nutrientes para a planta. Existe diferença genética na absorção e utilização de Ca e Mg por genótipos de feijoeiro.

## Capítulo 8

# Enxofre

## INTRODUÇÃO

O enxofre (S), que é exigido pelas plantas tanto quanto o fósforo (P), tem recebido pouca atenção dos produtores, uma vez que os fertilizantes nitrogenados e fosfatados usados nas lavouras contêm razoável quantidade desse elemento. A deficiência de S e a redução de sua quantidade no solo podem ocorrer graças ao cultivo intensivo por vários anos (o que esgota a sua reserva natural, que é pequena) e ao uso cada vez mais frequente de misturas de fertilizantes de alta concentração (como os preparados com ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio). Oliveira et al. (1996) relataram que a deficiência de S ocorre comumente em solos com baixo teor de matéria orgânica após muitos anos de cultivo, em solos formados com material de origem pobre em sulfatos, em solos rochosos e em cinzas vulcânicas. Rosolem (1996) relataram que a resposta positiva à aplicação do enxofre pode ocorrer em solos arenosos, com baixo teor de matéria orgânica, ou em solos cultivados durante algum tempo e nos quais se utilizam adubos concentrados. A deficiência de S nas culturas anuais foi relatada em várias partes do mundo, inclusive no Brasil (BLAIR, 1987; BLAIR et al., 1978; FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2003b; FOTH; ELLIS, 1988; FRENEY et al., 1982; TISDALE et al., 1986).

A maior parte de S no solo é encontrada na matéria orgânica. Tabatabai e Bremner (1972) e Nogueira e Melo (2003) relataram que 95% do S do solo encontram-se na forma orgânica, que constitui importante reserva desse nutriente, especialmente nos solos com alto grau de intemperização. A forma preferencialmente absorvida pelas plantas é o íon sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cujo teor no solo é influenciado por fatores de clima, solo e planta e que, sendo relativamente móvel na solução do solo, entra em contato com as raízes principalmente por fluxo de massa (NOGUEIRA; MELO, 2003). O S orgânico pode se tornar disponível às plantas pela mineralização da matéria orgânica (DAVID et al., 1982) no solo, processo do qual faz parte a enzima arilsulfatase<sup>1</sup>, que hidrolisa ligações do tipo éster de sulfato, o que libera íons sulfato (TABATABAI; BREMNER, 1970). A atividade da arilsulfatase no solo decresce com a profundidade e com a diminuição do teor de matéria orgânica (BALIGAR et al., 1988).

A mineralização do  $\text{SO}_4^{2-}$  da matéria orgânica é bastante afetada pela relação carbono/nitrogênio/enxofre (C/N/S), que se estabiliza quando chega a 100/10/1. Assim, pode haver imobilização de S mineral se as

<sup>1</sup> Sua origem pode ser microbiana ou vegetal (GANESHAMURTHY; NIELSEN, 1990).

relações C/S ou N/S forem muito altas; ocorrerá liberação de S mineral apenas se as relações forem baixas (RAIJ, 1991). Tisdale et al. (1985) relataram que a mineralização de S ocorre quando a relação C/S é de aproximadamente 200 ou menor. Acima desse valor, ocorre a imobilização de  $\text{SO}_4^{2-}$  em várias formas orgânicas, particularmente quando a relação é maior do que 400. Uma relação N/S maior do que 20 também pode causar imobilização de S no solo (VITTI; NOVAES, 1986). Os restos culturais frescos geralmente têm relação C/S em torno de 50 (TISDALE et al., 1985, 1986). Dijkshoorn e Wijk (1966) relataram que, embora a relação entre N total e S total varie largamente, sob condições de nutrição mineral adequada, a relação N/S é bastante constante: 17,5 para as leguminosas e 13,8 para as gramíneas.

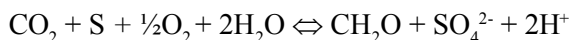
A carência de S nas plantas se manifesta com frequência crescente em todo o mundo, e o Brasil não é exceção (MALAVOLTA, 1980). Respostas das culturas à aplicação de S têm sido frequentes em experimentos realizados no Brasil e em outras regiões tropicais (RAIJ, 1991). Portanto, o uso adequado desse elemento no sistema solo-planta, mediante adubação básica equilibrada quantitativa e qualitativamente, é importante para aumentar a sua eficiência de uso, o que pode aumentar a produtividade, e para reduzir o custo da produção e a poluição do meio ambiente. Este Capítulo tem como objetivo discutir a nutrição mineral do feijoeiro em relação ao S.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

A sequência da transformação do S pelos processos de oxidação e de redução em compostos orgânicos e fertilizantes é chamada de ciclo do S (FAGERIA et al., 2003b). O S, como elemento essencial para microrganismos e plantas, encontra-se no solo em contínua oscilação entre as formas orgânicas e inorgânicas (CASTELLANO; DICK, 1990). A natureza dos compostos e suas transformações são influenciadas por processos biológicos que, por sua vez, sofrem influência das condições do ambiente.

A fonte primária de S são as rochas ígneas, nas quais o elemento ocorre, em geral, em pequenas proporções, como sulfato. Na maioria dos solos agricultáveis, entre 90% (TRACY et al., 1990) e 95% (TABATABAI, 1984) do S total encontra-se na forma orgânica, que permanece combinada com C e N; o mesmo ocorre nas plantas, em que o S é elemento constituinte das proteínas. Na forma mineral, o teor de S no solo geralmente

é menor do que 5% do total. Em solos aeróbicos, a oxidação do S ocorre de acordo com a seguinte equação (TISDALE et al., 1985):



As bactérias responsáveis pela oxidação do S são as do gênero *Thiobacillus*. Em condições anaeróbicas, como em solos inundados, ocorrem a redução do sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) a sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ) e a formação de  $\text{H}_2\text{S}$  (FAGERIA, 1984). A redução do sulfeto é efetuada por um pequeno grupo de bactérias estritamente anaeróbicas pertencentes aos gêneros *Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum*, as quais usam  $\text{SO}_4^{2-}$  no processo respiratório (BLAIR et al., 1978). Essas bactérias usam o  $\text{H}^+$  e uma grande variedade de produtos fermentados no processo de redução do  $\text{SO}_4^{2-}$ , toleram altas concentrações de sais e  $\text{H}_2\text{S}$  e se desenvolvem melhor na faixa de pH de 5,5 a 9,0. Baixas temperaturas e altas concentrações de nitrato, ferro (Fe) e manganês (Mn) retardam a redução do  $\text{SO}_4^{2-}$ . Por causa do caráter estritamente anaeróbico das bactérias *Desulfovibrio* e *Desulfotomaculum*, a redução dos íons  $\text{SO}_4^{2-}$  ocorre sob potenciais de oxirredução mais baixos do que os da redução do Fe e é favorecida pela oxidação da matéria orgânica na ausência de  $\text{O}_2$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ . Portanto, nos solos pobres em  $\text{Fe}^{3+}$ , a redução do sulfato pode causar a produção de quantidades elevadas de  $\text{H}_2\text{S}$  e problemas às raízes das plantas de arroz. O Fe não só retarda a redução do S e o aparecimento de  $\text{H}_2\text{S}$ , mas também o precipita na forma  $\text{FeS}$ .

A dinâmica do sulfato solúvel em água em solos inundados, que é medida pela sua redução, depende das propriedades do solo. Em solos neutros ou alcalinos, a concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$  pode chegar a  $1.500 \text{ mg kg}^{-1}$  e voltar a 0 depois de 6 semanas de submersão. Em solos ácidos, primeiro ocorre um aumento de  $\text{SO}_4^{2-}$  solúvel, depois, um pequeno decréscimo e, em seguida, um aumento por vários meses. O aumento inicial da concentração de  $\text{SO}_4^{2-}$ , acompanhado pelo aumento de pH, é atribuído à liberação de  $\text{SO}_4^{2-}$  fortemente adsorvido, sob pH baixo, pelas argilas e óxidos e hidróxidos de Fe e alumínio (Al) (FAGERIA, 1984).

Embora sejam produzidas grandes quantidades de  $\text{H}_2\text{S}$  em solos submersos, sua concentração solúvel em água pode ser pequena e quimicamente quase não detectável. Isso se deve à sua remoção como sulfetos insolúveis, principalmente  $\text{FeS}$ , motivo pelo qual os solos submersos raramente contêm mais do que  $0,1 \text{ mg}$  de  $\text{H}_2\text{S kg}^{-1}$ . A redução do sulfato pode permitir a formação de solos completamente opostos com relação à

sua reação (pH). O sulfato de sódio, presente em grande quantidade nos solos salino-sódicos, pode ser convertido em  $H_2S$  e bicarbonato de sódio durante os períodos de inundação. Essa reação diminui a salinidade e aumenta a alcalinidade. A redução do sulfato, em solos inundados, tem três implicações para a cultura do arroz: 1) o suprimento de S pode tornar-se insuficiente; 2) o zinco (Zn) e o cobre (Cu) podem ser imobilizados; e 3) pode ocorrer toxidez de  $H_2S$  em solos com baixo teor de Fe (FAGERIA, 1984).

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA E FUNÇÕES

Os sintomas de deficiência de S assemelham-se aos de deficiência de N. A diferença é que a deficiência de S começa nas folhas mais novas, enquanto a deficiência de N começa nas folhas mais velhas. Entretanto, com o tempo, se a deficiência persistir, todas as folhas ficam amareladas (Figura 1). A deficiência de S resulta em perda de vigor e produtividade reduzida. As plantas afetadas são atrofiadas, com caules finos e folhas de verde-pálidas a amarelas. Há redução na formação de ramos e no número de flores e vagens (OLIVEIRA et al., 1996). Os sintomas de deficiência de S, com fotografias coloridas, na cultura do feijoeiro são descritos por Rosolem (1996).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 1.** Planta de feijoeiro com deficiência de enxofre (S).

Fonte: Fageria et al. (1996).



Fageria (2009) relatou que, em culturas anuais, as funções do S são semelhantes às do N. Segundo Fageria e Gheyi (1999), o S tem as seguintes funções principais na planta: 1) é essencial para a formação de proteínas; 2) favorece a produção de enzimas e vitaminas; 3) promove a formação de nódulos nas leguminosas; 4) é necessário para a formação da clorofila, embora não seja constituinte dela; 5) sua deficiência causa atraso na maturação das sementes e dos frutos; 6) é necessário para a formação da nitrogenase; 7) aumenta o teor proteico total das forrageiras; 8) melhora a qualidade dos grãos; 9) aumenta o teor de óleo das sementes de oleaginosas; 10) aumenta a resistência à deficiência hídrica; 11) controla certas doenças do solo; e 12) aumenta o teor de carboidratos nos grãos.

## TEOR E ACUMULAÇÃO NA PLANTA

O teor e a acumulação de S, que variam de acordo com a idade da planta, são importantes parâmetros para o diagnóstico nutricional e a manutenção da fertilidade do solo. Geralmente, o teor diminui com o avanço da idade da planta por causa do aumento na massa da matéria seca da parte aérea; é o chamado “efeito de diluição” na nutrição de plantas (FAGERIA, 2009). Da mesma forma, o aumento na acumulação de nutrientes com o avanço da idade está associado com o aumento da massa da matéria seca da parte aérea. O teor de nutrientes é expresso em  $\text{g kg}^{-1}$  ou porcentagem. O teor suficiente de S na parte aérea da planta do feijoeiro está na faixa de 0,25% a 0,70% ou de  $2,5 \text{ g kg}^{-1}$  a  $7,0 \text{ g kg}^{-1}$  da matéria seca (OLIVEIRA et al., 1996). Fageria et al. (2011) relataram o teor adequado do S na parte aérea do feijoeiro na fase vegetativa na faixa de  $1,6 \text{ g kg}^{-1}$  a  $6,4 \text{ g kg}^{-1}$  (0,16% a 0,64%), enquanto Malavolta et al. (1989) constataram, nas folhas do feijoeiro, o teor de S na faixa de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  a  $10 \text{ g kg}^{-1}$  (0,5% a 1,0%). Thung e Oliveira (1998) relataram que o nível crítico adequado em plantas do feijoeiro situa-se entre  $5,9 \text{ g kg}^{-1}$  a  $7,9 \text{ g kg}^{-1}$  (0,59% a 0,79%). Os teores de S nas folhas do feijoeiro em diferentes idades da planta são apresentados na Tabela 1. O teor de S variou de  $5,6 \text{ g kg}^{-1}$  a  $8,1 \text{ g kg}^{-1}$ , com valor médio de  $5,9 \text{ g kg}^{-1}$ .

O crescimento da planta é harmonioso em todo o seu ciclo, e a fase de maior alongamento (tanto da parte aérea como da raiz) da planta coincide com a de maior absorção de nutrientes (OLIVEIRA et al., 1996). A planta do feijoeiro exige maior quantidade de nutrientes no período de 20 dias após a semeadura até 80 dias de idade, durante o qual aumenta a massa da matéria seca da parte aérea e ocorre formação de vagens e

grãos (FAGERIA et al., 2006a). Raij (1991) relatou que os teores de S em folhas variam pouco em plantas bem nutridas, estando, em geral, entre 0,2% e 0,4%. Thung e Oliveira (1998) relataram que a taxa de absorção mais alta ocorre durante o florescimento, declinando na fase reprodutiva. Os mesmos autores relataram a acumulação em torno de 9 kg de S t<sup>-1</sup> de grãos produzidos. Ainda, relataram que, durante o florescimento, o feijoeiro absorve aproximadamente 13 kg de S ha<sup>-1</sup> e, com essa quantidade de nutriente absorvido, a planta pode alcançar alta produtividade.

**Tabela 1.** Teor de enxofre (S) em folhas de feijoeiro de acordo com a idade da planta.

| Idade (dia) | Teor de S (g kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------|---------------------------------|
| 20          | 5,9                             |
| 30          | 6,4                             |
| 40          | 5,9                             |
| 50          | 5,6                             |
| 60          | 7,4                             |
| 70          | 8,1                             |
| 80          | 7,4                             |
| Média       | 5,9                             |

Fonte: adaptado de Thung e Oliveira (1998).

Alvarez Venegas et al. (2007) relataram que o teor de S no feijoeiro varia de 2,0 g kg<sup>-1</sup> a 3,0 g kg<sup>-1</sup> quando todas as folhas foram analisadas na floração; de 5,0 g kg<sup>-1</sup> a 10,0 g kg<sup>-1</sup> quando foi analisada a primeira folha amadurecida a partir da ponta do ramo, no início da floração; e de 1,5 g kg<sup>-1</sup> a 2,0 g kg<sup>-1</sup> quando as folhas do terço mediano foram analisadas na floração.

## INTERAÇÕES COM OUTROS NUTRIENTES

Interações entre nutrientes essenciais são importantes graças a sua contribuição para o aumento da produtividade. A interação entre N e S é muito comum em culturas anuais, inclusive no feijoeiro (FAGERIA, 2009); com o aumento da dose de N, aumenta a necessidade de S, e o mesmo pode acontecer com relação ao P. A resposta do P depende da adubação adequada de N e S. Se o solo não tem teor adequado de S, pode aparecer

a sua deficiência. A aplicação de S elementar abaixa o pH do solo e pode aumentar a disponibilidade de micronutrientes como Fe, Mn, Zn.

## **ESTRATÉGIAS DE MANEJO PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO**

O S é móvel no solo, como o N, e o manejo apropriado de fertilizantes sulfurados é igual aos dos fertilizantes nitrogenados no sistema solo-planta. Em comparação ao N, o S é absorvido em pequena quantidade pelo feijoeiro. Em torno de 90% do S é encontrado no solo na matéria orgânica, que pode fornecer significativa quantidade desse nutriente para as plantas. Pesquisas mostraram que, ao contrário de culturas em solo com alto teor de argila, que não respondem à aplicação de S, as culturas em solos arenosos respondem significativamente à aplicação de fertilizantes contendo S (MENGEL; REHM, 2000). As estratégias mais comuns para o aumento da eficiência de uso de S são aplicação da dose certa e escolha de métodos de aplicação e fontes corretos.

### **Dose adequada**

A aplicação de dose adequada de S é o principal fator na determinação do uso desse elemento pelas culturas. Embora o melhor critério para definir a dose seja a análise do solo, dados sobre o nível crítico de S para o feijoeiro são escassos. Porém, trabalhos realizados por vários pesquisadores mostraram que o teor de S no solo na faixa de 10 mg kg<sup>-1</sup> a 12 mg kg<sup>-1</sup> é suficiente para obter a máxima produtividade econômica (REISENAUER et al., 1973). Normalmente, o extrator de S do solo é o fosfato monocalcico, em água ou em ácido acético.

### **Métodos de aplicação**

A aplicação de fertilizantes contendo S no sulco de semeadura junto com outros nutrientes é o melhor método de aplicação. A aplicação de N em cobertura na forma de sulfato de amônio pode fornecer o S necessário à cultura.

### **Fonte apropriada**

Existem várias fontes de S que podem ser utilizadas. Na Tabela 2, são listadas as principais. As aplicações recomendadas de S são, em geral,

de 20 kg ha<sup>-1</sup> a 40 kg ha<sup>-1</sup>, dependendo do teor de matéria orgânica no solo e da produtividade esperada.

**Tabela 2.** Principais fontes de enxofre (S).

| Fertilizante/corretivo                                                                                             | S (%) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Sulfato de amônio [(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ]                                               | 24,0  |
| Polissulfeto de amônio (NH <sub>4</sub> S <sub>x</sub> )                                                           | 45,0  |
| Sulfonitrato de amônio [(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> ]         | 12,0  |
| Solução de tiosulfato de amônio [(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O] | 26,0  |
| Sulfato de magnésio (MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O)                                                         | 13,0  |
| Gesso (sulfato de cálcio bi-hidratado) (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O)                                      | 17,0  |
| Superfosfato simples [Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> + CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O]     | 12,0  |
| Superfosfato triplo [Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O]                           | 1,4   |
| Sulfato de cobre (CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O)                                                            | 13,0  |
| Sulfato de zinco (ZnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O)                                                             | 18,0  |
| Enxofre elementar (S)                                                                                              | 100,0 |
| Sulfato de sódio (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                                                                | 23,0  |
| Sulfato de potássio (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                                                              | 18,0  |
| Sulfato de manganês (MnSO <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O)                                                         | 14,5  |
| Sulfato ferroso (FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O)                                                             | 11,5  |
| Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )                                                                              | 50,0  |
| Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                                                                  | 32,7  |
| Sulfato de ferro e amônio [Fe(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ]                                     | 16,0  |

Fonte: Fageria (2009).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deficiência de S ocorre em solos arenosos, com baixo teor de matéria orgânica, sob cultivo intensivo e que não receberam adubação adequada. A maior parte do S do solo está na forma orgânica, que é transformada em SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (forma disponível para as plantas) pela atividade

de microrganismos. O S exerce várias funções fisiológicas e químicas nas plantas. Pelo fato de o S não ser móvel na planta, os sintomas de sua deficiência primeiramente aparecem nas folhas mais novas. Se a deficiência persiste por longo tempo, a planta inteira passa a apresentar clorose amarela. A análise de solo e plantas pode ser utilizada como critério para identificar deficiência ou suficiência do S no solo. O nível crítico de S no solo está em torno de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ . Sua deficiência pode ser corrigida com a aplicação de gesso, sulfato de amônio, superfosfato simples e outras fontes solúveis de S. Geralmente, uma aplicação de  $20 \text{ kg de S ha}^{-1}$  a  $40 \text{ kg de S ha}^{-1}$  é suficiente para obter a máxima produtividade econômica.

## Capítulo 9

# Zinco

## INTRODUÇÃO

A produtividade agrícola pode ser limitada em algumas regiões do Brasil pela deficiência de micronutrientes decorrente da baixa fertilidade natural desses solos, da maior remoção nas colheitas e do uso crescente de corretivos da acidez ou da aplicação de calcário. Além disso, o desenvolvimento de fertilizantes NPK mais puros, que deixam de fornecer micronutrientes (pois são considerados impurezas), tem contribuído para a ocorrência de deficiências de micronutrientes no solo (BORTOLON; GIANELLO, 2009). A deficiência de zinco (Zn) em culturas anuais é relatada em várias partes do mundo, inclusive no Brasil (ABREU; LOPES, 1987; DE DATTA, 1981; FAGERIA, 2009; FAGERIA; BALIGAR, 1996; FAGERIA; BARBOSA FILHO, 1994; FAGERIA et al., 2003a; FOLLETT et al., 1981; GRAHAM et al., 1992; TISDALE et al., 1985; WELCH et al., 1991). Cerca de 30% da área cultivada no mundo e 50% dos solos usados na produção de cereais são considerados deficientes em Zn (GRAHAM et al., 1992; WELCH, 1993). A deficiência desse elemento não só diminui a produtividade, como também a qualidade dos grãos (CAKMAK et al., 1998), e pode estar relacionada com os seguintes fatos: a) baixo teor natural de Zn no solo; b) aumento do pH dos solos ácidos após a aplicação de calcário; c) cultivo em solos arenosos; d) falta de aeração com a compactação do solo; e) remoção da camada superficial do solo onde se encontra o Zn acumulado; f) movimento de terra na sistematização do terreno; g) baixo teor de matéria orgânica; e h) maior necessidade de nutrientes das cultivares modernas, graças ao seu maior potencial de produtividade (FAGERIA, 2009; ZHANG et al., 1998).

Mortvedt (1992) relatou que a deficiência de Zn é mais comum em solos com pH maior do que 6,0, especialmente em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica. A forte adsorção de Zn nos solos, particularmente naqueles com argila predominantemente oxídica ou em condições de pH mais elevado, tem sido considerada importante causa da sua restrita disponibilidade para as plantas (OLIVEIRA et al., 1999). Ademais, a deficiência de Zn pode ser aumentada pela aplicação de adubação fosfatada – graças à interação antagônica entre Zn e fósforo (P) no solo e na planta e ao desequilíbrio na relação P/Zn – e pelo aumento na produtividade com a aplicação de P (HALDAR; MANDAL, 1981; MANDAL; HALDAR, 1980, 1990; OLSEN, 1972). O nível adequado da relação P/Zn na planta é considerado em torno de 100 (WILKINSON et al., 2000). Tanto a baixa como a alta relação P/Zn diminuem a produtividade das culturas. Isso significa que o equilíbrio nutricional é muito importante para se obter alta produtividade das culturas.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O ciclo do Zn no sistema solo-planta é relacionado à sua forma e disponibilidade para a planta e à sua solubilidade. A maior parte do Zn do solo encontra-se na estrutura cristalina de minerais ferromagnesianos, como a augita, a hornblenda e a biotita. Uma alta proporção do Zn se encontra também adsorvida em formas trocáveis na argila, na matéria orgânica (MALAVOLTA, 1980) e em carbonatos. Além dessas, existem outras formas desse nutriente no solo: Zn solúvel em água, Zn trocável e Zn organicamente complexado. A caracterização dessas formas é difícil por causa da pequena quantidade de Zn envolvida. A forma oxidada de Zn no solo, em ambiente natural, é  $\text{Zn}^{2+}$ . O Zn forma várias espécies ou complexos na solução do solo após o processo de hidrólise. De acordo com Lindsay (1979), o complexo  $\text{ZnSO}_4^0$  (sulfato de zinco) pode ser de grande importância no solo e contribuir de forma significativa para a quantidade total de Zn na solução. Assim, a inclusão de sulfato entre os fertilizantes com Zn é recomendável, pois aumenta a solubilidade do nutriente e, ao mesmo tempo, sua mobilidade no solo. Já os complexos  $\text{ZnNO}_3^+$ ,  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2^0$ ,  $\text{ZnCl}^+$ ,  $\text{ZnCl}_2^0$ ,  $\text{ZnCl}_3^-$ ,  $\text{ZnCl}_4^{2-}$  e  $\text{ZnH}_2\text{PO}_4^+$  geralmente pouco contribuem para a quantidade total de Zn solúvel. A quelação é outro fator importante que pode influenciar a solubilidade e a movimentação dos metais, como o Zn, nos solos (BARBER, 1995).

A disponibilidade de Zn nos solos drenados ou em terras altas é maior do que em solos inundados (YOSHIDA, 1975), onde há diminuição substancial na concentração de Zn na solução do solo (YOSHIDA, 1981). A deficiência de Zn é frequentemente relatada em solos com baixo teor de matéria orgânica (FOLLETT et al., 1981). A adição de matéria orgânica nesses solos aumenta a disponibilidade de Zn. Discussão detalhada sobre a química do Zn no solo pode ser encontrada nos artigos escritos por Lindsay (1972, 1979).

A disponibilidade de Zn pode ser influenciada não apenas pelos teores de argila, matéria orgânica, óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e carbonatos, mas também pelo pH do solo (ABREU et al., 2001; ANDRE et al., 2003). A espécie predominante de Zn na solução do solo com pH abaixo de 7,7 é  $\text{Zn}^{2+}$ ; a espécie  $\text{ZnOH}^+$  é mais comum em solos com pH acima desse valor. A espécie neutra  $[\text{Zn}(\text{OH})_2^0]$  é a principal forma em solos com pH maior do que 9,1 (LINDSAY, 1979).

Segundo Lindsay (1979), as espécies de Zn que contribuem significativamente para o Zn inorgânico total na solução do solo podem ser representadas pela seguinte equação:



$$(\text{Zn inorgânico}) = \text{Zn}^{2+} + \text{ZnSO}_4^0 + \text{ZnOH}^+ + \text{Zn}(\text{OH})_2^0 + \text{ZnHPO}_4^0$$

Quando o pH do solo aumenta, o Zn é mais adsorvido pelos óxidos e hidróxidos de Fe, de Al (ANDRE et al., 2003; CAVALLARO; MCBRIDGE, 1984; OKAZAKI et al., 1986; STAHL; JAMES, 1991a) e de manganês (Mn) (ANDRE et al., 2003; STAHL; JAMES, 1991b). Sims (1986), trabalhando com solo arenoso com baixo teor de matéria orgânica (1,6%), verificou que, numa variação de pH de 4,8 a 7,7, a quantidade de Zn trocável diminuiu de 42% para 1%, enquanto a quantidade de Zn ligado aos óxidos de Fe amorfos aumentou de 4% para 26%. Zhu e Alva (1993) observaram quantidade da forma solúvel de Zn < 2% em solos arenosos com pH 6,0 ou maior. Segundo Zhang et al. (1997), o aumento do pH do solo causou a precipitação dos cátions metálicos sobre óxidos de Mn e de Fe cristalinos e amorfos, decrescendo, por sua vez, as quantidades da forma trocável e da ligada à matéria orgânica.

Observa-se, na Figura 1, que o teor de Zn na parte aérea da planta de feijoeiro diminuiu significativamente com o aumento do pH do solo de Cerrado (Oxisolo) na faixa de 5,0 a 7,0. O teor de Zn, que estava em torno de 70 mg kg<sup>-1</sup> sob pH 5,0, caiu para 10 mg kg<sup>-1</sup> quando o pH atingiu 7,0. O valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) na equação da Figura 1 sinaliza que a variabilidade no teor de Zn na planta com a mudança do pH foi de 96%.

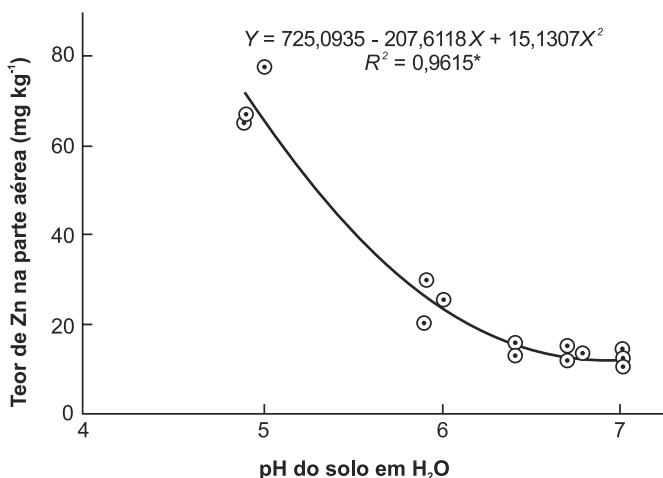


**Figura 1.** Efeito do pH no teor de zinco (Zn) na parte aérea do feijoeiro em solo de Cerrado.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2006a).

Da mesma forma, o teor de Zn em solo de várzea diminuiu significativamente com o aumento do pH. Sob pH 4,9, o teor de Zn estava em 3,9 mg kg<sup>-1</sup>, mas, com o aumento do pH para 7,0, o teor de Zn diminuiu para 3,1 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 1); houve, portanto, uma diminuição de 26%.

**Tabela 1.** Efeito do pH no teor de zinco (Zn) em solo de várzea.

| pH em água               | Teor (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------|-----------------------------|
| 4,9                      | 3,9                         |
| 5,9                      | 4,2                         |
| 6,4                      | 4,0                         |
| 6,7                      | 3,6                         |
| 7,0                      | 3,1                         |
| <i>R</i> <sup>2(1)</sup> | 0,90**                      |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria e Baligar (1999).

O pH adequado para a cultura do feijoeiro em solos de Cerrado e várzea situa-se em torno de 6,0 a 7,0 (ver Capítulo 3). Lindsay (1972) relatou que o aumento de uma unidade de pH provoca uma diminuição de 100 vezes na concentração de Zn na solução do solo. Porém, McBride e Blasiak (1979) e Barber (1995) relataram que a concentração de Zn na solução de solo diminuiu 30 vezes com a elevação do pH de uma unidade, na faixa de pH entre 5 e 7. O Zn foi sorvido preferencialmente em relação ao cálcio (Ca), sugerindo que ocorreu sorção química do Zn hidrolisado (STAHL; JAMES, 1991a). Isso significa que a disponibilidade do Zn é altamente dependente do pH (BARBER, 1995) e que o uso em excesso de calagem pode causar a deficiência desse nutriente. A diminuição na absorção e no teor de Zn na solução com o aumento do pH do solo pode estar relacionada com o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva do solo (FAGERIA et al., 1996). Quanto maior a CTC do solo, maior será a capacidade de absorção de zinco (HARTER, 1983; MCBRIDE, 1989; MCBRIDE; BLASIAK, 1979; SAEED; FOX, 1977; SHUMAN, 1975). De acordo com Lindsay (1979) e Stahl e James (1991b), o efeito do pH > 6 na

redução da atividade de metais na solução do solo é atribuído ao aumento no pH dependente da carga de óxidos de Fe, Al e Mn.

Warncke e Barber (1973) relataram que, em solo com pH entre 4,8 e 5,1, a formação de complexos do Zn com a matéria orgânica e a argila é mínima, o que também pode aumentar sua concentração na solução.

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

O Zn não é tão móvel na planta quanto os outros micronutrientes. Portanto, a sua deficiência geralmente começa nas folhas mais novas (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2003a). Fageria et al. (1996) relataram que, graças à imobilidade do Zn no floema e a sua associação com reguladores de crescimento, os sintomas de deficiência de Zn se manifestam, em geral, nas partes novas da planta.

A deficiência de Zn reduz o crescimento da planta, que se torna uniformemente verde-amarelada. A folha trifoliolada e a planta de feijoeiro deficientes em Zn são mostradas na Figura 2. A deficiência severa reduz o crescimento da parte aérea e do sistema radicular (Figuras 3 e 4). Para facilitar a identificação dos sintomas de deficiência de Zn nas plantas de feijoeiro, existem publicações com fotografias coloridas (FAGERIA et al., 1996; WALLACE, 1961; WILCOX; FAGERIA, 1976).

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 2.** Deficiência de zinco (Zn) na planta do feijoeiro.

Fonte: Fageria et al. (1996).

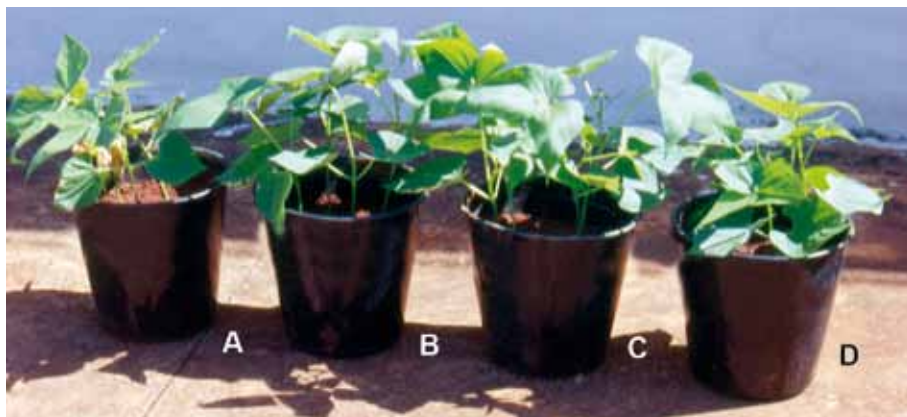


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 3.** Crescimento da parte aérea do feijoeiro sob diferentes doses de zinco (Zn) em solo de Cerrado. As doses de Zn são 0 (A), 5 mg kg<sup>-1</sup> do solo (B), 10 mg kg<sup>-1</sup> do solo (C) e 80 mg kg<sup>-1</sup> de solo (D).

Fonte: Fageria (2009).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 4.** Crescimento do sistema radicular do feijoeiro sob diferentes doses de zinco (Zn) em solo de Cerrado. As doses de Zn são 0 (A), 5 mg kg<sup>-1</sup> do solo (B) e 120 mg kg<sup>-1</sup> do solo (C).  
Fonte: Fageria (2009).

## FUNÇÕES

Os micronutrientes na planta agem como catalisadores em vários processos enzimáticos. Sua quantidade demandada pelas plantas é bem menor do que a de macronutrientes (FAGERIA, 2009). Graham e Rengel (1993) e Rengel e Graham (1995) mostraram que sementes com alto teor de Zn plantadas em solos deficientes nesse nutriente funcionaram como fertilizante na fase inicial de crescimento, ajudaram na melhoria do vigor da plântula e aumentaram a resistência das plantas às doenças e a sua capacidade produtiva. O Zn participa em várias funções bioquímicas na planta (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 1996, 2003a, 2011):

- É necessário para a produção de clorofila e para a formação de carboidratos.
- Ajuda na ativação de sistemas enzimáticos.
- Está estreitamente associado ao metabolismo de nitrogênio (N) nas plantas.
- É requerido na síntese do triptofano, que, por sua vez, é precursor do ácido indolacético.
- Possivelmente está envolvido na formação de amido.
- Desempenha papel importante na floração e frutificação, as quais são significativamente reduzidas sob deficiência desse nutriente.
- Afeta a integridade das membranas biológicas, do mesmo modo que o Ca.

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO DE ZINCO NO SOLO

A partir da análise de solo, que é um dos principais parâmetros de avaliação de sua fertilidade, foram calculados os teores de Zn adequado e tóxico (utilizando os extratores Mehlich 1 e ácido dietilenotriaminopentacético + trietanolamina – DTPA-TEA) em relação à produção relativa da parte aérea (Figuras 5 e 6). Os valores de Zn extraídos pelo extrator Mehlich 1 são geralmente maiores do que os extraídos pelo extrator DTPA (Figuras 5 e 6). Porém, a absorção de Zn pelas culturas anuais está relacionada significativamente com ambos os extratores (FAGERIA et al., 2003a). Portanto, pode ser usado qualquer um dos dois extratores para análise do solo para avaliação do estado do Zn na cultura do feijoeiro.

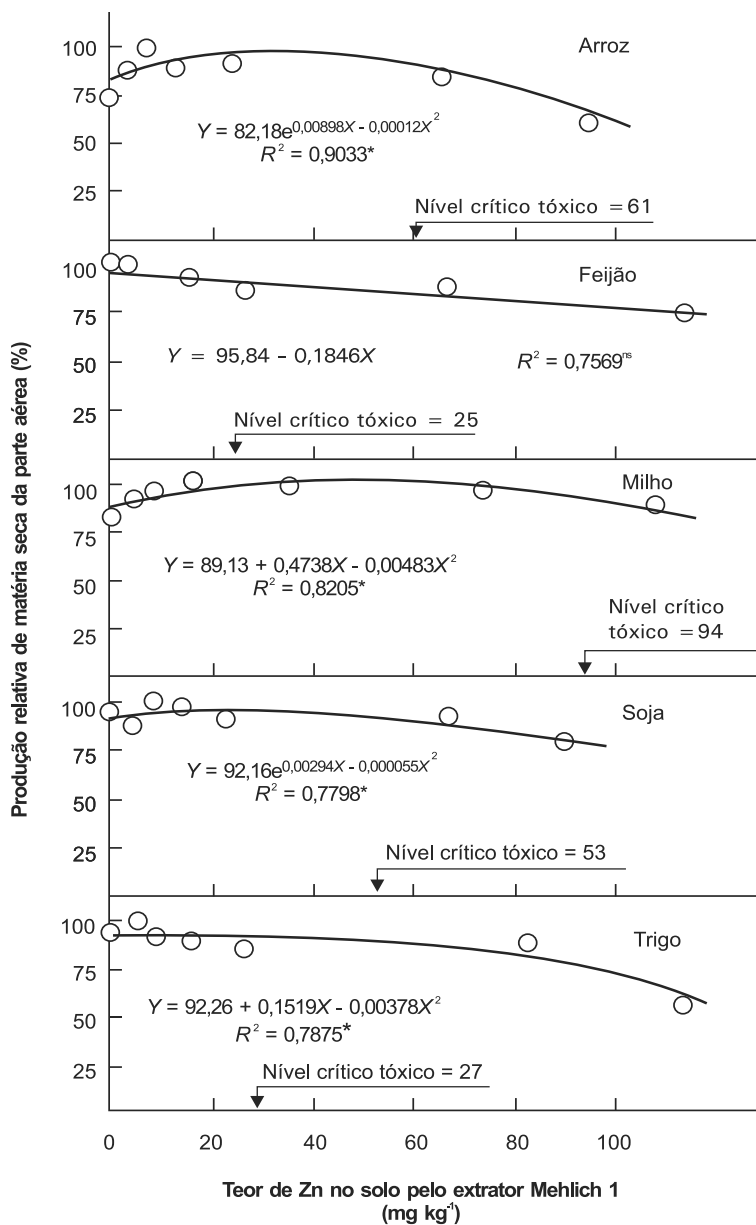


**Figura 5.** Relação entre o teor de zinco (Zn) no solo extraído pelo extrator Mehlich 1 e a produção relativa de matéria seca da parte aérea das culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado.

\* Significativo a 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: adaptado de Fageria (2000b).

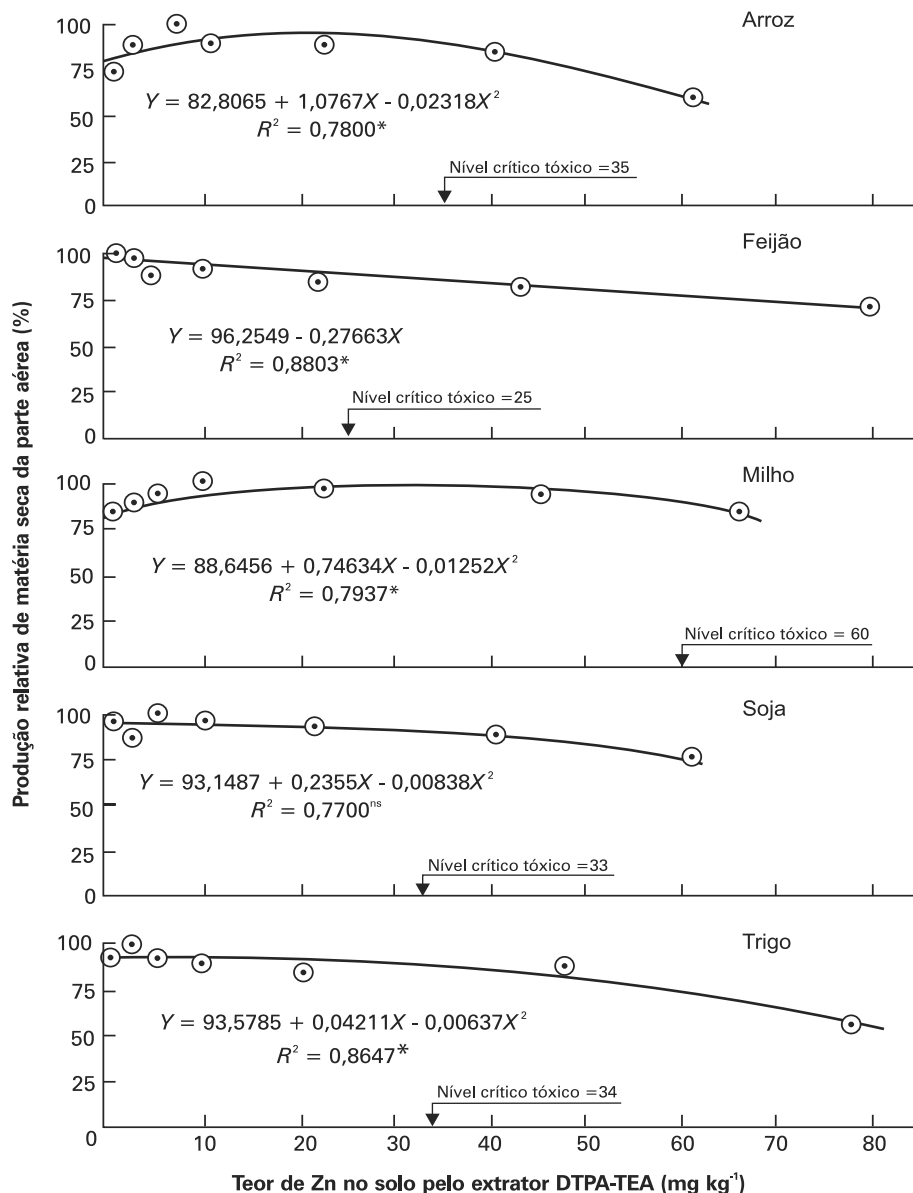


**Figura 6.** Relação entre o teor de zinco (Zn) no solo extraído pelo extrator ácido dietilenotriaminopentacético + trietanolamina (DTPA-TEA) e a produção relativa de matéria seca da parte aérea das culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado.

\* Significativo a 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: adaptado de Fageria (2000b).

Foram avaliadas respostas das culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo ao teor de Zn no solo. As culturas de arroz, milho, soja e trigo mostraram resposta significativa e quadrática com o aumento do teor de Zn no solo. A produção relativa do feijão diminuiu com o aumento de teor de Zn no solo. Com base em 90% de produção relativa, o teor adequado de Zn no solo pelo extrator Mehlich 1 foi de 5 mg kg<sup>-1</sup> para a cultura de arroz, 0,7 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 2 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 0,8 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 0,5 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Quando o teor de Zn no solo foi extraído pelo extrator DTPA-TEA, os níveis adequados de Zn foram de 4 mg kg<sup>-1</sup> para arroz, 1 mg kg<sup>-1</sup> para milho e 0,3 mg kg<sup>-1</sup> para feijão, soja e trigo. Em uma revisão de literatura a partir de vários solos e culturas, Martens e Lindsay (1990) relataram que os níveis críticos de Zn variaram de extrator para extrator e de cultura para cultura. Esses autores relataram os níveis críticos de Zn na faixa de 0,5 mg kg<sup>-1</sup> a 3 mg kg<sup>-1</sup> de solo para as culturas de arroz, feijão, milho e soja pelos extratores Mehlich 1 e DTPA-TEA. Os níveis críticos de Zn para a cultura da soja em solo de Cerrado ficaram entre 0,27 mg kg<sup>-1</sup> a 0,37 mg kg<sup>-1</sup> de solo pelo extrator DTPA-TEA. Lindsay e Norvell (1978) encontraram 0,8 mg de Zn kg<sup>-1</sup> de solo como nível crítico para a cultura do milho com extrator DTPA-TEA. No Brasil, as melhores correlações entre os teores de Zn em solos e o seu teor nas plantas têm sido obtidas pelos métodos em que se emprega a solução DTPA-TEA como extrator (CANTARELLA et al., 1998). Porém, a solução Mehlich 1 também apresenta correlações válidas, com valores iguais ou um pouco inferiores (ABREU, 1995).

Os resultados obtidos em Fageria (2000b) estão nessa mesma faixa de valores. O valor do nível crítico do arroz é um pouco mais alto. Essa diferença pode estar relacionada com o pH do solo e a idade da planta. O teor tóxico de Zn no solo pelo extrator Mehlich 1, baseado em 10% de redução da produção relativa após atingir o nível máximo, foi de 61 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz, 25 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 94 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 53 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 27 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Os valores obtidos com o extrator DTPA-TEA foram 35 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz, 25 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 60 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 33 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 34 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Isso significa que a tolerância das culturas à toxidez de Zn no solo está na seguinte ordem: milho > arroz > soja > trigo > feijão. Como, na literatura, há poucas informações para as culturas anuais em solo de Cerrado, os dados que estão efetivamente disponíveis serão muito úteis na interpretação dos dados de análise de solo para a produção das principais culturas anuais.



## TEORES ADEQUADO E TÓXICO DE ZINCO NA PLANTA

O teor de Zn na planta é a medida da sua concentração por unidade de matéria seca da planta (expressa em  $\text{mg kg}^{-1}$ ), que é usado no diagnóstico de deficiência ou suficiência do nutriente na planta.

Os teores adequados de Zn na planta foram determinados com base em 90% da produção máxima para cada cultura (Figura 7). Esses valores foram  $67 \text{ mg kg}^{-1}$  para o arroz,  $18 \text{ mg kg}^{-1}$  para o feijão,  $27 \text{ mg kg}^{-1}$  para o

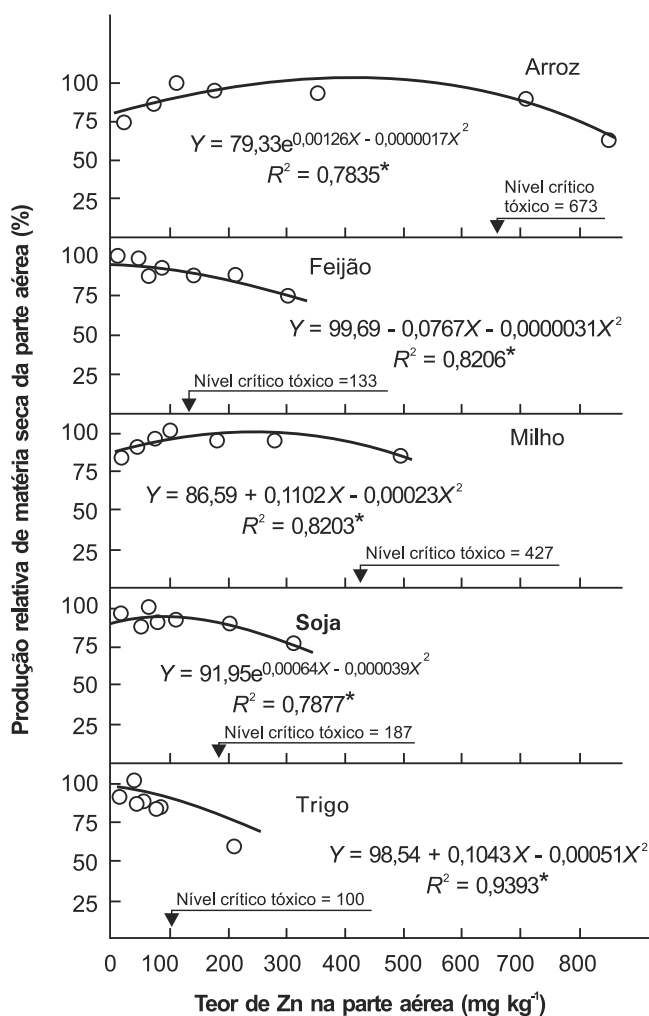


**Figura 7.** Relação entre o teor de zinco (Zn) na parte aérea e a produção relativa de matéria seca da parte aérea das culturas do arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2000b).

milho, 20 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 19 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. O nível adequado de Zn na parte aérea durante a fase inicial de crescimento das culturas é de 47 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz, 35 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 20 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 21 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 15 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo (FAGERIA et al., 2011).

Os teores tóxicos de Zn na planta foram 673 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz, 133 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 427 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 187 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 100 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Isso significa que o arroz é mais tolerante à toxidez de Zn, e o feijão é mais sensível. Não existem muitas informações na literatura nesse sentido, mas Fageria (1992) relatou níveis tóxicos de Zn na parte aérea das culturas anuais com teores maiores do que 400 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca.

## ACUMULAÇÃO DE ZINCO NA PLANTA

A acumulação na planta, às vezes também chamada de absorção de nutrientes, é calculada pela multiplicação do teor pela massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos e indica a quantidade de nutrientes extraída pela cultura. Trata-se de uma informação importante no manejo da fertilidade do solo. O teor e a acumulação de nutrientes na planta são determinados por concentração do nutriente no solo, idade da planta e nível de produtividade. A quantidade de Zn acumulado na parte aérea das várias culturas relacionou-se com os níveis de Zn aplicado no solo (Figura 8). A acumulação foi significativa e quadrática para todas as culturas e, na comparação entre elas, a ordem de acumulação foi a seguinte: milho > arroz > feijão > soja > trigo. Essa diferença na acumulação está relacionada com a produção de matéria seca da parte aérea e com as diferentes capacidades de absorção e acumulação de cada espécie.

## EFICIÊNCIA DE USO DO ZINCO

Em geral, a eficiência de recuperação dos micronutrientes, inclusive do Zn, é baixa no sistema solo-planta. De acordo com Mortvedt (1994), a taxa de recuperação dos micronutrientes varia de 5% a 10%. A eficiência do uso do Zn pode ser aumentada com o uso de dose adequada, método e época de aplicação apropriadas e de fontes solúveis (ver seção *Recomendações de adubação com zinco* a seguir). De acordo com Mortvedt (1992), pelo menos 40% do Zn total nos fertilizantes devem

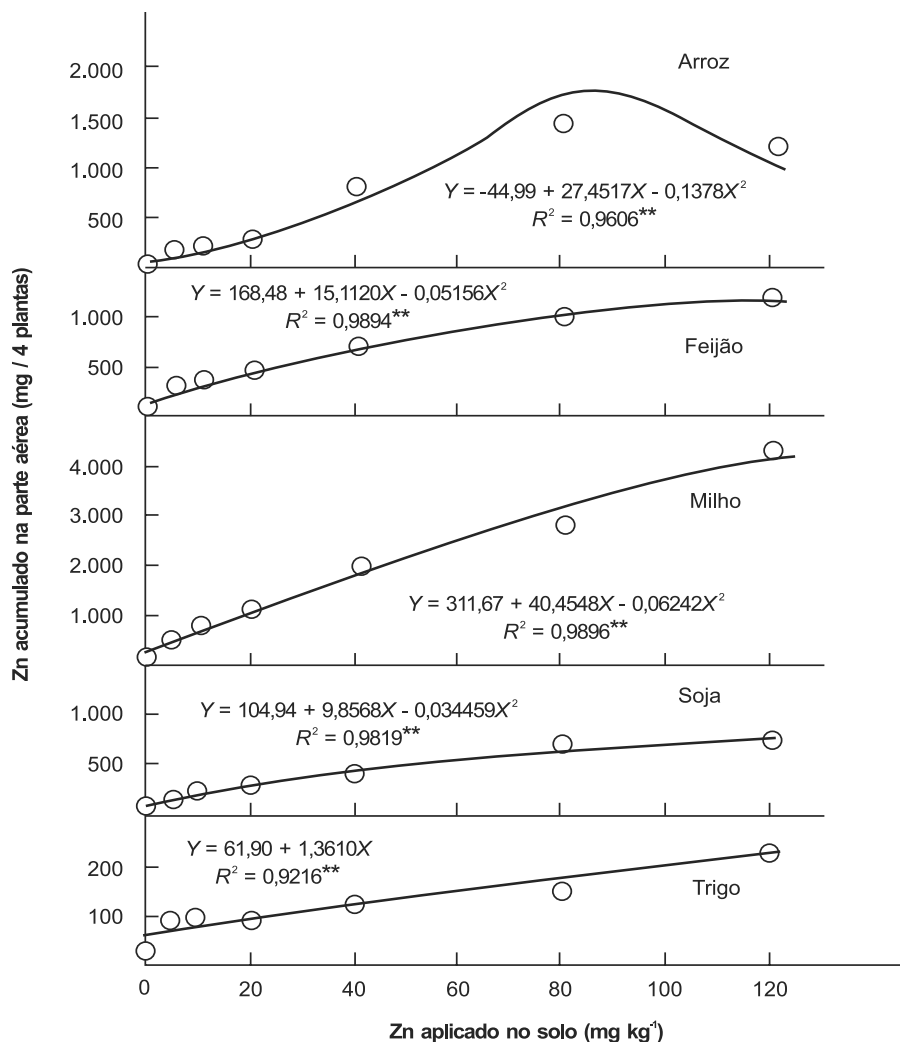


**Figura 8.** Relação entre o zinco (Zn) aplicado no solo e o Zn acumulado na parte aérea das culturas do arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2000b).

ser solúveis em água. Barbosa Filho et al. (1999) recomendaram que, no processo de granulação, sejam utilizadas fontes que tenham pelo menos de 40% a 50% do elemento solúvel em água. Singh et al. (1983) relataram que a necessidade de Zn varia de espécie para espécie e entre cultivares da mesma espécie.

INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

A absorção de Zn pelas plantas não depende somente da concentração desse elemento na solução do solo, mas de outros fatores, particularmente da presença de Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup>, que, quando em altas concentrações na solução do solo, têm efeito antagônico na absorção de Zn. Giordano et al. (1974) relataram que a ordem de interferência na absorção de Zn foi Fe = Cu<sup>1</sup> > Mg<sup>2</sup> > Mn > Ca, e a ordem de interferência na translocação de Zn foi Fe = Cu > Ca > Mn. Discussão detalhada sobre as interações de Zn com outros nutrientes é apresentada por Loneragan e Webb (1993). A influência do Zn no teor de P na parte aérea do feijoeiro é apresentada na Tabela 2. Observa-se que o teor de P diminuiu significativamente com o aumento da dose de Zn no solo.

**Tabela 2.** Influência de zinco (Zn) no teor de fósforo (P) na parte aérea do feijoeiro cultivado em solo de Cerrado.

| Dose de Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) | Teor de P (g kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0                                 | 1,80                            |
| 5                                 | 1,82                            |
| 10                                | 1,45                            |
| 20                                | 1,32                            |
| 40                                | 1,10                            |
| 80                                | 1,05                            |
| 120                               | 1,02                            |
| R <sup>2(1)</sup>                 | 0,93**                          |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação.  
\*\* Significativo a 1% de probabilidade.  
Fonte: adaptado de Fageria (2009).

RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO COM ZINCO

Recomendações de adubação envolvem dose adequada e fontes e época de aplicação apropriadas. Fageria (2000) relataram que a dose de Zn recomendada para corrigir a deficiência na maioria das culturas anuais é de 1 mg kg<sup>-1</sup> a 10 mg kg<sup>-1</sup> do solo (Figura 9) e que a melhor fonte de Zn é o sulfato de zinco, devido a sua alta solubilidade em água.

<sup>1</sup> Cobre.  
<sup>2</sup> Magnésio.

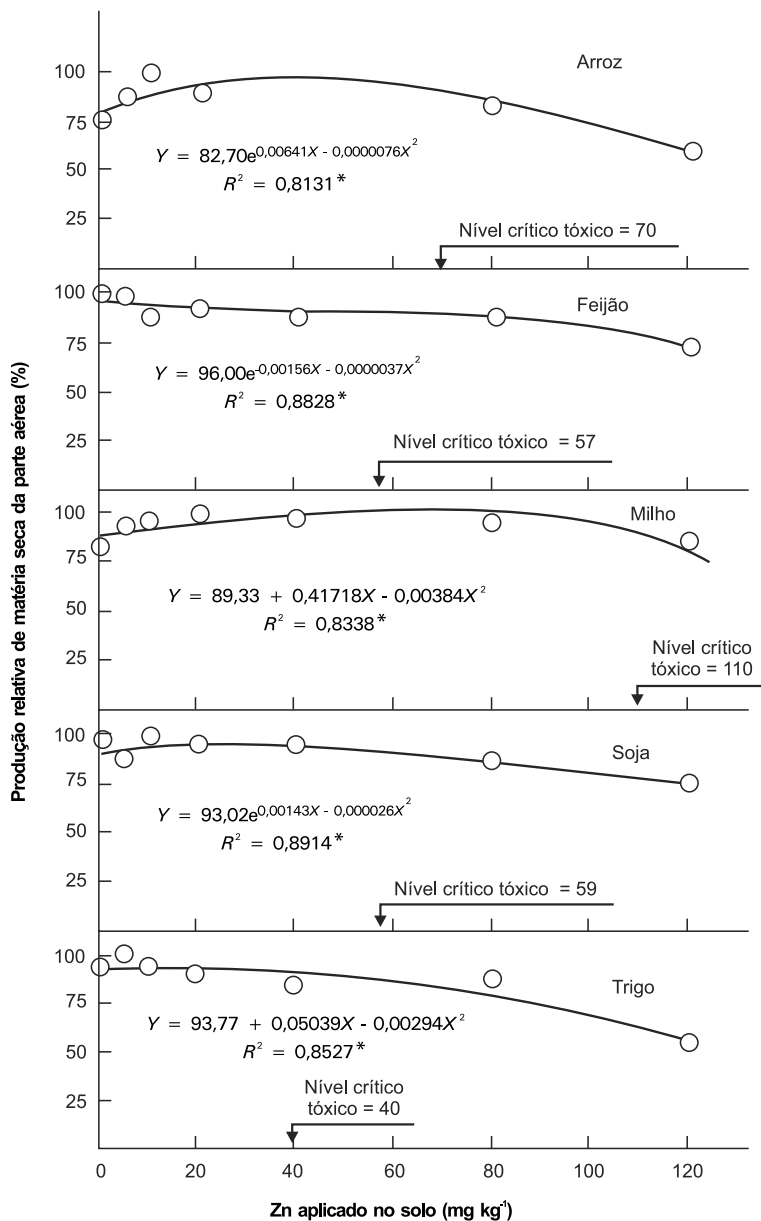


**Figura 9.** Relação entre o zinco (Zn) aplicado no solo e a produção relativa da matéria seca da parte aérea das culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2000b).

Na recomendação de adubação, deve ser levado em consideração o teor de Zn no solo. Martens e Lindsay (1990), ao fazerem uma revisão do assunto, chegaram à conclusão de que os valores críticos de Zn extraível por DTPA-TEA, para várias culturas anuais, variaram de 0,5 mg kg<sup>-1</sup> a 1,4 mg kg<sup>-1</sup>.

Para que seja efetiva, a correção da deficiência de Zn, que geralmente aparece na fase vegetativa da planta, pode ser feita com pelo menos duas aplicações de sulfato de zinco via foliar na concentração de 0,5%. Apesar da indicação da aplicação via foliar (que necessita de uma área foliar mínima para ser efetiva), Martens e Westerman (1991) relataram que o método mais efetivo para corrigir a deficiência de Zn é a aplicação no solo. Como os fertilizantes com Zn têm efeito residual prolongado, uma só aplicação pode corrigir a deficiência por muitos anos. Por exemplo, a aplicação de 28 kg ha<sup>-1</sup> com sulfato de zinco foi suficiente para corrigir a deficiência de Zn nas plantas por 4 a 7 anos (MARTENS; WESTERMANN, 1991; TAKKAR; WALKER, 1993). As principais fontes de Zn são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3.** Principais fontes de zinco (Zn) como fertilizante.

| Nome comum                                                                | Teor de Zn (%) | Solubilidade em água |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|
| Sulfato de zinco (mono-hidratado) (ZnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O)   | 36             | Solúvel              |
| Sulfato de zinco (hepta-hidratado) (ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O) | 23             | Solúvel              |
| Cloreto de zinco (ZnCl <sub>2</sub> )                                     | 48–50          | Solúvel              |
| Óxido de zinco (ZnO)                                                      | 50–80          | Não solúvel          |
| Quelato de zinco (Na <sub>2</sub> Zn-EDTA)                                | 14             | Solúvel              |
| Quelato de zinco (NaZn-HEDTA)                                             | 9              | Solúvel              |
| Fritas de zinco (Fritas)                                                  | 4–9            | Pouco solúvel        |

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2002).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deficiência de Zn nas culturas anuais, incluindo o feijoeiro, é relatada no Brasil e está relacionada com baixo teor natural, calagem em solos ácidos, uso de cultivares modernas (que necessitam de maior

quantidade de nutrientes) e erosão do solo. O nível crítico de Zn na planta está na faixa de 20 mg kg<sup>-1</sup> a 50 mg kg<sup>-1</sup>, dependendo da idade da planta, e o nível crítico no solo situa-se em torno de 1 mg kg<sup>-1</sup>, dependendo do extrator e do pH. A deficiência de Zn pode ser corrigida com a aplicação de 2 kg de Zn ha<sup>-1</sup>. A melhor fonte de Zn é o sulfato de zinco, que apresenta alta solubilidade em água. O Zn pode ser aplicado no sulco de semeadura, junto com a adubação básica. Porém, se aparecer deficiência durante o ciclo da cultura, pode ser usado sulfato de zinco via foliar na concentração de 0,5%. A aplicação pode ser repetida 10 a 12 dias após a primeira, se a deficiência for muito acentuada.

## Capítulo 10

# Boro



## INTRODUÇÃO

O uso de micronutrientes (entre eles, o boro – B) na agricultura brasileira, de 1992 a 2004, teve um aumento de 1.300%, período durante o qual se chegou a um consumo de 700 mil toneladas por ano (PINAZZA; BORSARI, 2004; ROSOLEM et al., 2008). O B, que, assim como o cloro (Cl), é um micronutriente não metálico, é um elemento essencial para o desenvolvimento normal das culturas anuais, pois participa de vários processos bioquímicos e fisiológicos – como transporte de ácido indolacético, atividade da ATPase (GOLDBACH et al., 2001), manutenção da integridade da membrana, síntese da parede celular, metabolismo fenólico, do RNA e de carboidratos, além de respiração e lignificação (GUPTA, 1993; LIMA et al., 2007) – nas plantas. A descoberta do B como nutriente essencial para as plantas ocorreu no ano de 1923, por Warington (FAGERIA et al., 2011). A quantidade necessária de B para as culturas anuais é apenas maior do que a de molibdênio (Mo) e, às vezes, é a mesma do cobre (Cu). O B é absorvido pelo sistema radicular das plantas como ácido bórico não dissociado na solução do solo mediante um processo passivo (e não metabólico). Portanto, sua disponibilidade é governada pela sua concentração na solução do solo e pelas taxas de absorção de água e de transpiração (FAGERIA, 2009; HU; BROWN, 1997).

A deficiência de B é observada em várias partes do mundo, inclusive nos solos brasileiros (BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998; FAGERIA, 2000a, 2009; FAGERIA et al., 2003a; FAGERIA; STONE, 2008; GUPTA, 1979; OLIVEIRA NETO et al., 2009; SAH; BROWN, 1997; SHORROCKS, 1997). A resposta positiva das culturas à aplicação de B é um critério importante na definição da deficiência desse elemento. De acordo com esse critério, a deficiência de B é relatada em mais de 80 países e em 132 culturas (SHORROCKS, 1997). Bataglia e Raij (1990) relataram que a deficiência de B em diversas culturas anuais no Brasil tem provocado grandes perdas de produtividade. Foram relatadas respostas à aplicação de B em algumas culturas anuais em solo de Cerrado (BUZETTI et al., 1990; CARVALHO et al., 1996; FAGERIA et al., 2007; GALRÃO, 1984) e várzeas do Brasil (FAGERIA et al., 2003b).

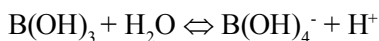
O B na solução do solo ocorre como ácido não dissociado ( $H_3BO_3$ ). A deficiência desse elemento é mais comum em solos de textura arenosa com baixos teores de matéria orgânica. Alta precipitação pluvial também causa deficiência graças à lixiviação no perfil do solo como íon  $B(OH)_3$ .

As propriedades do solo que influenciam a disponibilidade de B são discutidas por Fageria et al. (2002a, 2003a) e Fageria (2009). A quantidade de B suficiente para corrigir a deficiência desse elemento é de 1 kg ha<sup>-1</sup> a 2 kg ha<sup>-1</sup>. Em média, o teor de B na água do mar situa-se em torno de 4,6 mg L<sup>-1</sup>, o que indica que minerais solúveis foram removidos da superfície do solo pelo processo de intemperismo (BARBER, 1995).

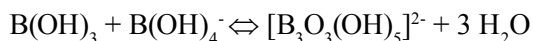
A necessidade de B varia de espécie para espécie e entre cultivares da mesma espécie, sendo maior para as leguminosas do que para os cereais (BENNETT, 1993). Em condições de campo, a recuperação do B pelas culturas anuais, durante um ciclo de cultivo, é de cerca de 5% a 15% (SHORROCKS, 1997), e a quantidade de B acumulada pelas culturas anuais situa-se em torno de 100 g ha<sup>-1</sup> a 200 g ha<sup>-1</sup>. Em solos com textura média (15% a 30% de argila) e argilosos (argila > 35%), existe grande possibilidade de ocorrer efeito residual desse elemento, mas, em solos arenosos (argila < 15%), é necessário aplicar B anualmente, se existir a deficiência.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O conhecimento do ciclo de nutrientes no sistema solo-planta é fundamental para aumentar sua disponibilidade e eficiência na produção das culturas. O B está distribuído em vários componentes do solo, incluindo a solução do solo, a matéria orgânica e os minerais. No solo e na solução do solo, o B encontra-se na forma não dissociada de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> ou como ânion B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, ambos absorvidos pelas plantas. Portanto, a química do B (diferentemente da dos outros micronutrientes) no solo é um dos fatores que influencia sua absorção (FOTH; ELLIS, 1988). O B na solução do solo está prontamente disponível para absorção pelas plantas, mas essa forma constitui menos de 3% do total do B no solo (JIN et al., 1987; TSADILAS et al., 1994). A manutenção do B na solução do solo é importante para a nutrição das plantas (KEREN; BINGHAM, 1985a, 1985b) e está controlada pelas outras frações no solo e por seu equilíbrio com a solução do solo. Em baixa concentração (< 0,02 M) das espécies mononucleares – como B(OH)<sub>3</sub> e B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, o B(OH)<sub>3</sub> pode interagir com a água de acordo com a seguinte equação (POWER; WOODS, 1997):



Porém, em alta concentração e com o aumento do pH, são formados os íons polinucleares, como  $B_3O_3(OH)_4^-$ ,  $B_4O_5(OH)_4^{2-}$  e  $B_5O_6(OH)_4^-$  (POWER; WOODS, 1997). Portanto, a interação entre  $B(OH)_3$  e  $B(OH)_4^-$  pode formar  $[B_3O_3(OH)_5]^{2-}$ , como descrito a seguir (POWER; WOODS, 1997):



Vários fatores, como pH, teor de matéria orgânica, teor de argila, presença de óxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe) e de carbonatos, temperatura e práticas culturais, influenciam a quantidade de B extraível e a transformação das diferentes formas de B no solo (HOU et al., 1994; JIN et al., 1987; MANDAL et al., 1993; TSADILAS et al., 1994; YERMIYAHU et al., 1995; XU et al., 2001). Elrashidi e O'Connor (1982) verificaram relação positiva entre o teor de matéria orgânica e a adsorção de B. Gupta (1993) encontrou correlação positiva entre o teor de matéria orgânica e o B extraído com água quente. A adsorção de B aumenta com o aumento de material orgânico aplicado como composto (YERMIYAHU et al., 1995). Porém, Marzadori et al. (1991) relataram que a matéria orgânica exerce um papel positivo na liberação de B da superfície do solo pelo controle de características de reversão no processo de adsorção. Foth e Ellis (1988) concluíram que o B está associado com a matéria orgânica, e os solos com alto teor de matéria orgânica geralmente apresentam adequada concentração de B, em termos de fertilidade.

O pH do solo é um dos fatores mais importantes que determinam a disponibilidade de B para as plantas. Com o aumento do pH, diminui a disponibilidade de B para as plantas (GOLDBERG, 1997), o que está relacionado com o processo de adsorção (EVANS, 1987; LEHTO; MALKONEN, 1994). Alguns autores observaram que a adsorção de B aumenta com o aumento do pH na faixa de 3 a 9 (BARROW, 1989; GOLDBERG, 1997; KEREN et al., 1985). Keren e Bingham (1985b) relataram duas razões para a diminuição do B com o aumento do pH do solo: 1) abaixo do pH 7, predomina a forma  $B(OH)_3$ , e a afinidade dessa forma na adsorção aos coloides do solo é relativamente baixa; e 2) com o aumento do pH, a concentração de  $B(OH)_4^-$  aumenta em relação à de  $B(OH)_3$ , e a adsorção também aumenta. Portanto, a prática da calagem pode diminuir a disponibilidade de B nos solos ácidos por causa do processo de adsorção desse elemento no solo. A adsorção de B é altamente relacionada com o teor de carbonato de cálcio no solo (ELSEEWI; ELMALKY, 1979; ELRASHIDI;

O'CONNOR, 1982). A relação entre a redução no teor de B na parte aérea do feijoeiro e o aumento do pH na faixa de 5,0 a 7,0 em solo de várzea é ilustrada na Figura 1.

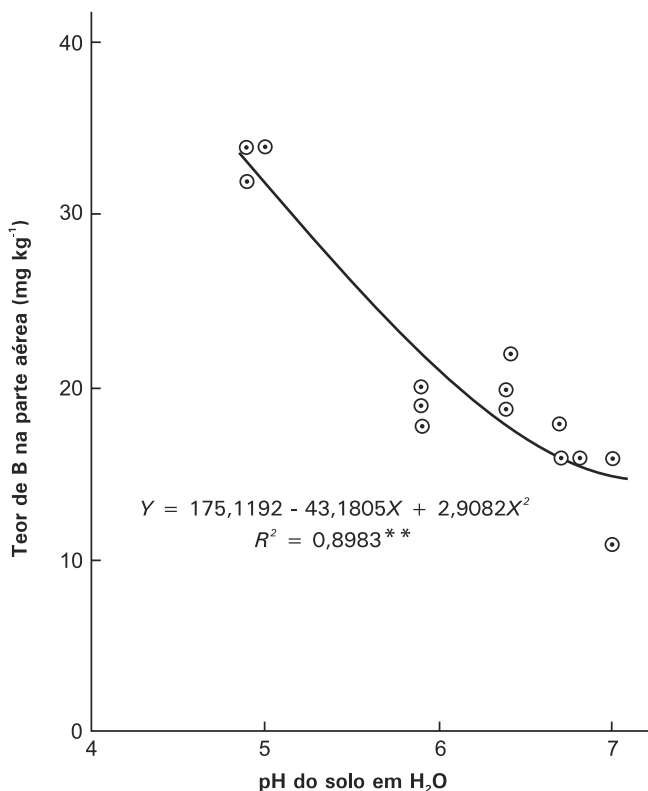


**Figura 1.** Relação entre pH do solo e teor de boro (B) na parte aérea do feijoeiro.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria et al. (2006a).

A textura do solo é outra propriedade importante na determinação da disponibilidade de B para as plantas (ROSOLEM et al., 2008). Os solos arenosos geralmente contêm menos B disponível do que os com textura argilosa. Portanto, a deficiência de B é mais comum em solos arenosos (FLEMING, 1980; GOLDBERG, 1997). Elrashidi e O'Connor (1982) relataram que existe correlação significativa e positiva entre o teor de argila no solo e o B extraído. Porém, os solos argilosos adsorvem mais B do que os arenosos (GOLDBERG; GLAUBIG, 1986). Portanto, os solos

arenosos necessitam de menos B do que os argilosos. Ferreira et al. (2001) relataram que, em 17 solos dos estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, usando o extrator água quente e  $\text{CaCl}_2$  a  $5 \text{ mmol L}^{-1}$ , a elevação dos teores de Fe livre, de argila e de matéria orgânica e dos valores da umidade equivalente reduziram significativamente a taxa de recuperação do B aplicado.

O pH da maioria de solos agricultáveis está na faixa de 5 a 8, de maneira que o B na solução do solo, nessa faixa de pH, geralmente está na forma de  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Quando o B é aplicado no solo, uma parte é adsorvida na fase sólida do solo e outra parte fica na solução. Biggar e Fireman (1960) observaram que a adsorção do B pela fase sólida do solo segue a equação de Langmuir. A adsorção varia de acordo com os teores de argila e de óxidos de Fe e Al. Sims e Johnson (1991) obtiveram relação linear entre a quantidade de B adsorvido e a quantidade de óxidos de Fe e Al. Vários trabalhos relataram a adsorção de B pelos óxidos de Fe e Al (GOLDBERG, 1997; GOLDBERG et al., 1993, 1996; TONER; SPARKS, 1995).

Berger e Truog (1940) propuseram a água quente como extrator de B, e, até agora, o B extraído dessa maneira tem servido como índice de disponibilidade para as plantas (BINGHAM, 1982). Esse método é largamente usado na determinação do teor de B no solo (SAH; BROWN, 1997) e geralmente se correlaciona bem com a absorção desse elemento pelas plantas (SELF; GUPTA, 1993). Raij (1991) e Ferreira et al. (2001) também relataram que o método de extração do B disponível pela água quente ainda é o mais recomendável e é considerado o padrão. Cox e Kamprath (1972) relataram a superioridade da extração do B do solo com água quente em relação aos métodos ácidos, salinos ou com soluções complexantes. Porém, Oliveira Neto et al. (2009) relataram que os teores de B no solo, extraídos pelos extratores água quente, Mehlich 1 e Mehlich 3, aumentaram linearmente com as doses de B em todas as profundidades avaliadas (até 5 cm, de 5 cm a 10 cm, de 10 cm a 20 cm, de 20 cm a 30 cm e de 30 cm a 40 cm), o que indica que ele apresenta mobilidade no perfil. Os extratores revelaram diferentes capacidades de extração do B, mas foram eficientes na avaliação da biodisponibilidade do nutriente para o girassol. Portanto, os métodos Mehlich 1 e Mehlich 3 podem ser utilizados na análise de B, assim como a água quente (OLIVEIRA NETO et al., 2009). Considerando que, no Brasil, a maioria dos laboratórios de análise de solo está usando o extrator Mehlich 1 para análise de fósforo

(P), potássio (K), zinco (Zn), Cu, Fe e manganês (Mn), esse extrator pode ser mais econômico. Rosolem et al. (2008) avaliaram três extratores para as análises de B do solo de Cerrado:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$  e água quente tradicional. O extrator que apresentou maior consistência, com equações de regressão significativas entre teores no solo e nas folhas de soja, foi o  $\text{CaCl}_2$ .

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

A deficiência de B afeta o crescimento dos órgãos novos das plantas; portanto, aparece primeiro nas extremidades das plantas. De acordo com Fageria (2009), a deficiência de B reduz o crescimento do feijoeiro (Figura 2). As folhas ficam deformadas e com coloração verde-escura (Figura 3). Os internós superiores ficam curtos, e as folhas jovens



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 2.** Crescimento do feijoeiro cultivado com (A) e sem boro (B) em solo de Cerrado.

Fonte: Fageria (2009).

Foto: Sebastião Araújo



**Figura 3.** Folha do feijoeiro com deficiência de boro (B).

Fonte: Fageria et al. (1996).

são encopadas. O tecido internerval é enrugado (OLIVEIRA et al., 1996). Em casos severos, os pontos em crescimento podem morrer. Os sintomas da deficiência de B nas plantas de feijoeiro são também apresentados com fotografias coloridas por Fageria et al. (1996), Oliveira et al. (1996), Wallace (1961) e Wilcox e Fageria (1976). As faixas tóxica e de suficiência de B no solo são muito baixas. Portanto, deve-se tomar cuidado com a aplicação de B nas culturas para que não cause toxidez. Os sintomas de toxidez de B nas folhas do feijoeiro são apresentados na Figura 4.

**Figura 4.** Sintomas de toxidez de boro (B) nas folhas do feijoeiro.

Fonte: Fageria (2009).



Foto: Sebastião Araújo



## FUNÇÕES

O B em nível adequado é essencial tanto para o aumento da produtividade como para melhorar a qualidade do produto. O B aumentou o desenvolvimento do sistema radicular na cultura do feijoeiro cultivado em solo de Cerrado (BALIGAR et al., 1998; FAGERIA, 1989a, 1992, 2000, 2009). O efeito do B sobre a matéria seca do sistema radicular do feijoeiro é ilustrado na Figura 5. Observa-se aumento nas raízes até a dose de 3 mg de B kg<sup>-1</sup> do solo; ocorre redução para doses maiores. A avaliação das raízes das culturas anuais é relevante parâmetro de crescimento, porque elas são importantes na absorção de nutrientes e água e estão altamente correlacionadas com a produção de matéria seca (Figura 6).

O B neutraliza o efeito tóxico do Al no crescimento das plantas dicotiledôneas (BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998; YANG; ZHANG, 1998). Por isso, sua aplicação em solo com Al tóxico pode promover o crescimento do sistema radicular e a absorção de nutrientes (LENOBLE et al., 1996; TAYLOR; MACFIE, 1994).

A necessidade de B na fase reprodutiva é maior do que na fase vegetativa para a maioria das espécies (BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998). As funções fisiológicas e bioquímicas do B foram enumeradas por Cakmak e Romheld (1997), Dugger (1983), Marschner (1995), Pilbeam e Kirkby (1983), Romheld e Marschner (1991) e Shelp (1993). Algumas funções do B nas plantas foram resumidas por Fageria et al. (1999):

- É essencial para a germinação dos grãos de pólen e o crescimento do tubo polínico.
- É essencial para a formação das sementes e da parede celular.
- Favorece a formação de proteínas.
- Contribui para a síntese de ácidos nucleicos.
- Ajuda na síntese de aminoácidos.
- É importante na translocação de açúcares.
- É importante no transporte de nutrientes pela membrana.



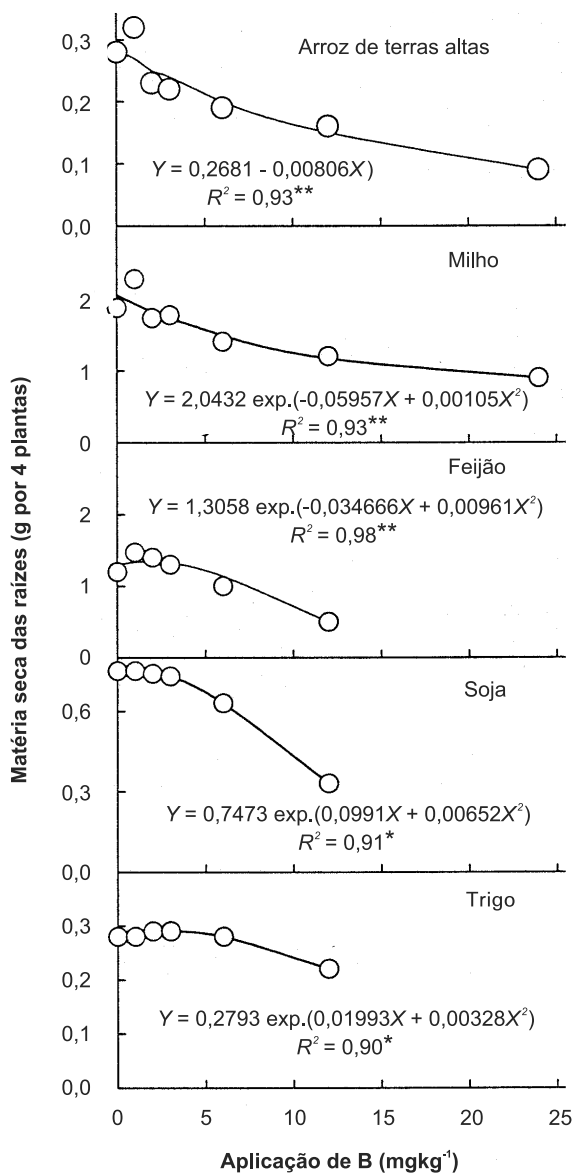


**Figura 5.** Relação entre boro (B) aplicado e matéria seca das raízes de culturas anuais.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

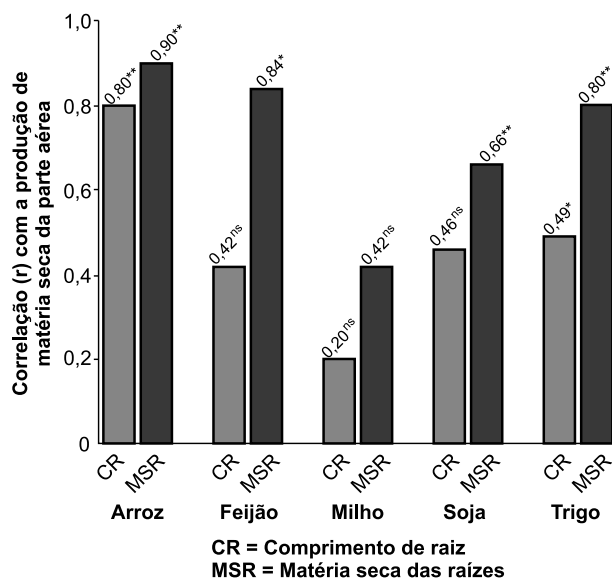


**Figura 6.** Correlação entre a produção de matéria seca da parte aérea, o comprimento e a matéria seca das raízes.

<sup>ns</sup> Não significativo; \*Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2000a).

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NO SOLO

O conhecimento de níveis adequados e tóxicos de B no solo é importante para identificação de sua deficiência ou suficiência. A partir da análise de solo (um dos principais parâmetros de avaliação da sua fertilidade), foram calculados os teores de B adequado e tóxico em relação à produção relativa da matéria seca da parte aérea (Figura 7). Os teores de B adequados no solo foram  $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$  para o arroz,  $0,9 \text{ mg kg}^{-1}$  para o feijão,  $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$  para o milho,  $2,6 \text{ mg kg}^{-1}$  para a soja e  $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$  para o trigo. Os níveis tóxicos de B no solo foram  $2,3 \text{ mg kg}^{-1}$  para o arroz,  $2,8 \text{ mg kg}^{-1}$  para o feijão,  $5,7 \text{ mg kg}^{-1}$  para o milho,  $5,2 \text{ mg kg}^{-1}$  para a soja e  $4,3 \text{ mg kg}^{-1}$  para o trigo. De acordo com Nable et al. (1997), teores de B no solo acima de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo são considerados tóxicos para as plantas. Mariano et al. (2000) relataram níveis adequados de B para o feijoeiro em solo de várzea variando de  $0,57 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $1,89 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo. Os mesmos autores relataram níveis tóxicos de B para o feijoeiro na faixa de  $1,87 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $4,65 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo. Fageria (2000a) relatou níveis adequados de B no solo

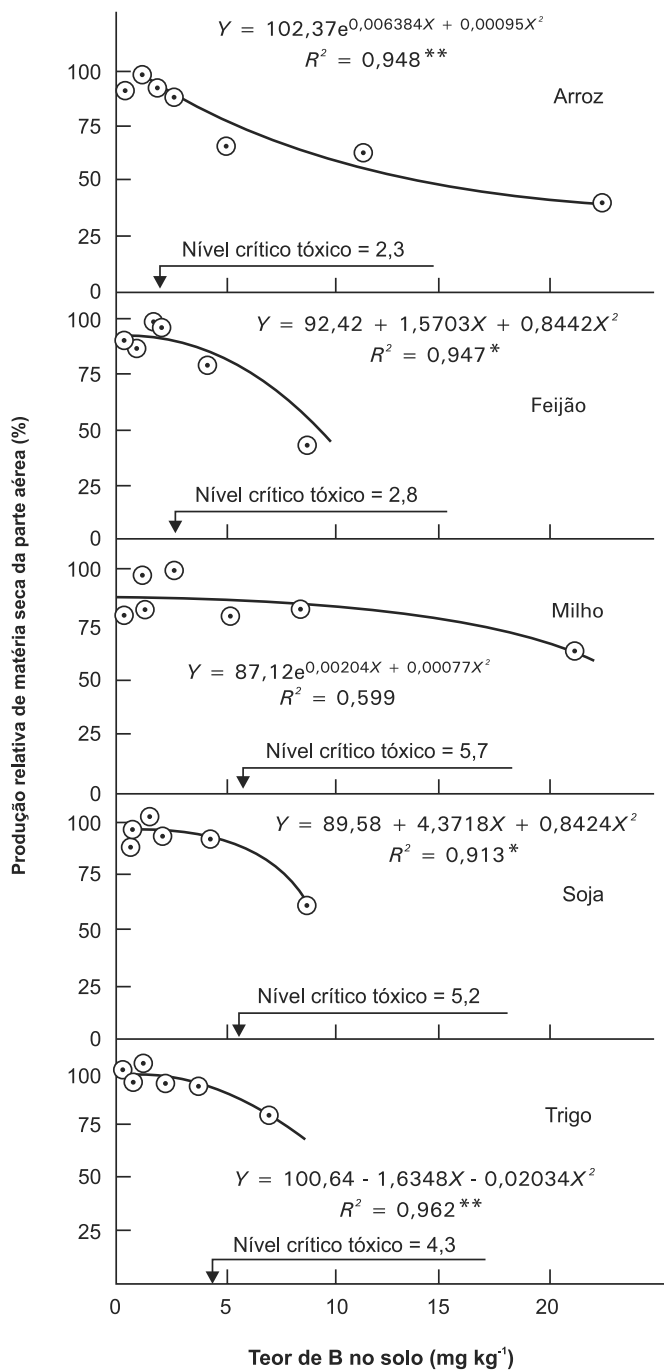


**Figura 7.** Relação entre teor de boro (B) no solo e produção relativa da matéria seca da parte aérea de culturas anuais em solo de Cerrado.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2000a).

entre  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo, dependendo das culturas. De acordo com Su et al. (1994), a adsorção de B em solos ácidos, assim como os níveis adequados e tóxicos, aumenta com a aplicação de  $\text{CaCO}_3$ . Robertson et al. (1975) relataram que o nível tóxico de B no solo para a cultura do feijoeiro é maior do que  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ . Reforçando este achado, Gupta (1983) relatou um valor de  $4 \text{ mg de B kg}^{-1}$  de solo como nível tóxico para as culturas de feijão e milho. Sims e Johnson (1991) relataram que o nível crítico de B no solo, extraído por água quente, para as culturas anuais, está na faixa de  $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$  a  $2 \text{ mg dm}^{-3}$ , dependendo da produtividade, do pH do solo, da textura, do teor de matéria orgânica e do solo.

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NA PLANTA

Os níveis adequados de B na parte aérea seguiram a ordem soja > feijão > milho > trigo > arroz. Isso significa que a soja acumulou mais B do que as outras culturas. Os níveis tóxicos estão na seguinte ordem: soja > trigo > feijão > milho > arroz (Figura 8). Os níveis adequados de B na parte aérea na fase inicial de crescimento das culturas são:  $10 \text{ mg de B kg}^{-1}$  para arroz, de  $10 \text{ mg de B kg}^{-1}$  a  $50 \text{ mg de B kg}^{-1}$  para feijão, de  $7 \text{ mg de B kg}^{-1}$  a  $25 \text{ mg de B kg}^{-1}$  para milho, de  $21 \text{ mg de B kg}^{-1}$  a  $55 \text{ mg de B kg}^{-1}$  para soja e de  $6 \text{ mg de B kg}^{-1}$  a  $10 \text{ mg de B kg}^{-1}$  para trigo.

## ACUMULAÇÃO NA PLANTA

A acumulação de B em função da quantidade aplicada pode ser vista na Figura 9. A acumulação foi altamente significativa e seguiu um modelo quadrático em todas as culturas. A acumulação máxima foi a do feijão, seguida pela do milho e da soja. A acumulação mínima foi a do trigo, seguida pela da cultura de arroz. Essas diferenças na acumulação estão relacionadas com a produção de matéria seca da parte aérea e com as capacidades de absorção e acumulação de cada espécie. A necessidade de B na fase reprodutiva é maior do que na fase vegetativa graças à sua importante função na formação dos grãos (BROWN; SHELPS, 1997). Pela sua característica de imobilidade na maioria das espécies de plantas, o B deve ser constantemente fornecido em todas as fases de desenvolvimento da planta (BROWN; SHELPS, 1997). Portanto, a deficiência de B na fase reprodutiva pode reduzir a produtividade das culturas, embora o teor de B esteja no nível adequado na planta durante a fase vegetativa.

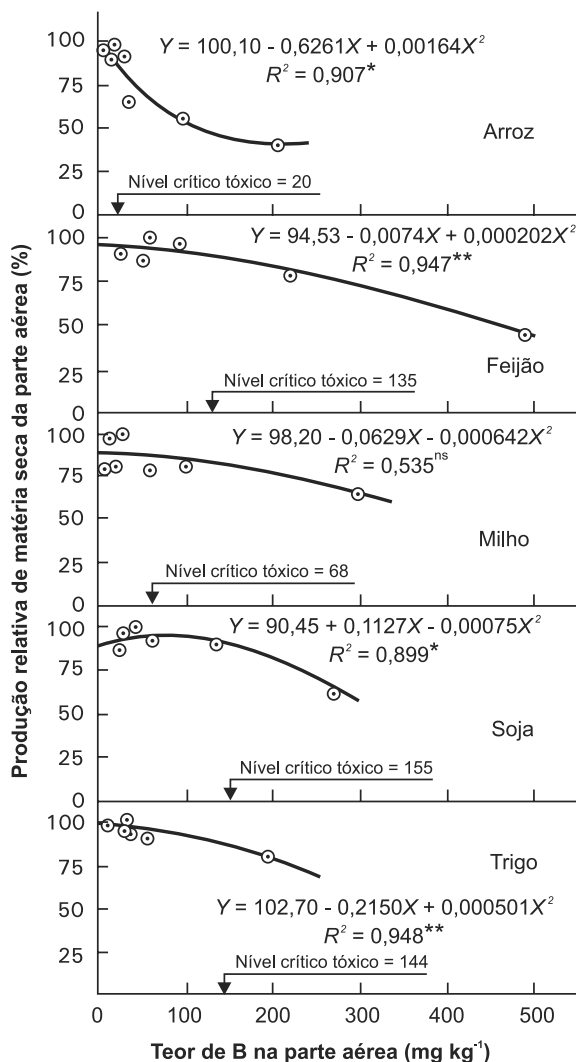


**Figura 8.** Relação entre teor de boro (B) na parte aérea da planta e produção relativa de matéria seca da parte aérea de culturas anuais.

Fonte: Fageria (2000).

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo.

Fonte: adaptado de Fageria (2000a).

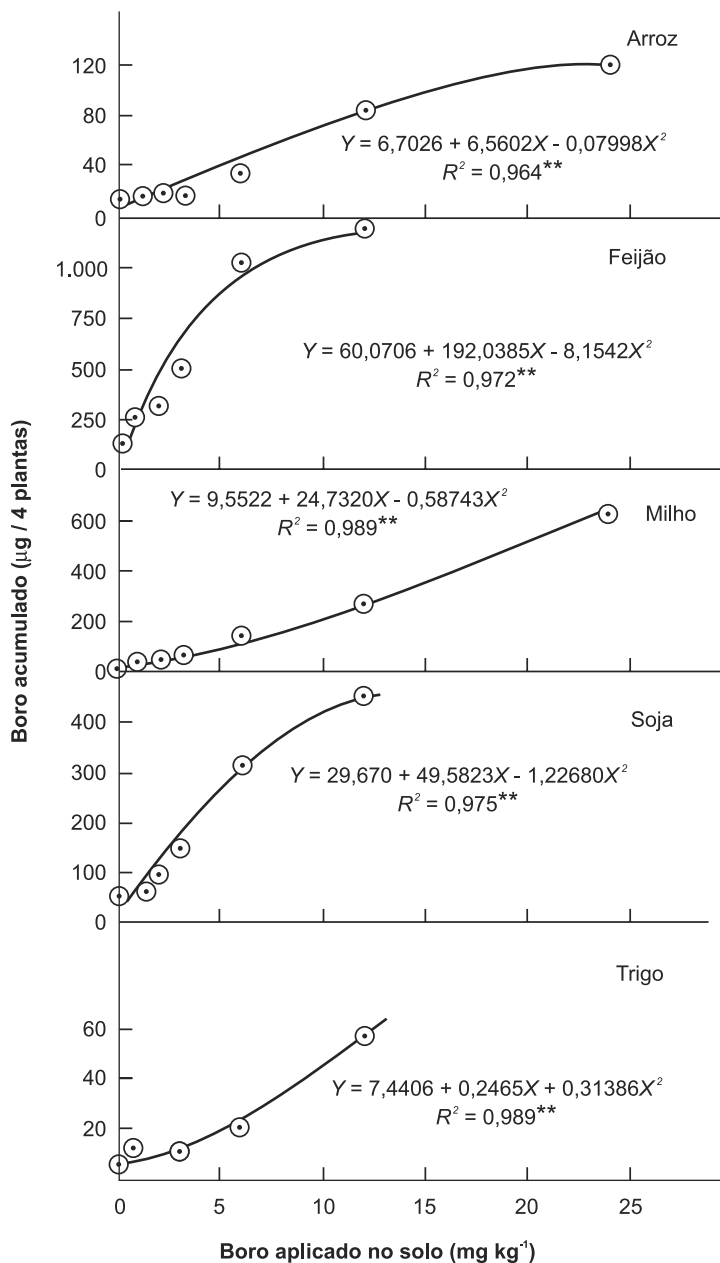


**Figura 9.** Relação entre boro (B) aplicado no solo e acumulação de B na parte aérea de culturas anuais.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2000a).

A acumulação de B durante o ciclo da cultura do feijoeiro é apresentada na Figura 10. A acumulação aumentou quase linearmente até a idade de 60 dias – o que está relacionado com o aumento de matéria seca da parte aérea (FAGERIA et al., 2006) – e depois diminuiu – o que se atribui à translocação de B para os grãos durante a fase de maturação. A variabilidade na acumulação de B com a idade das plantas foi de 73%. A recuperação de B durante o ciclo da cultura é em torno de 5% a 15% e, para a maioria das culturas anuais, a acumulação está na faixa de 100 g de B ha<sup>-1</sup> a 200 g de B ha<sup>-1</sup>, quantidade suficiente para uma boa produtividade (FAGERIA, 2009).

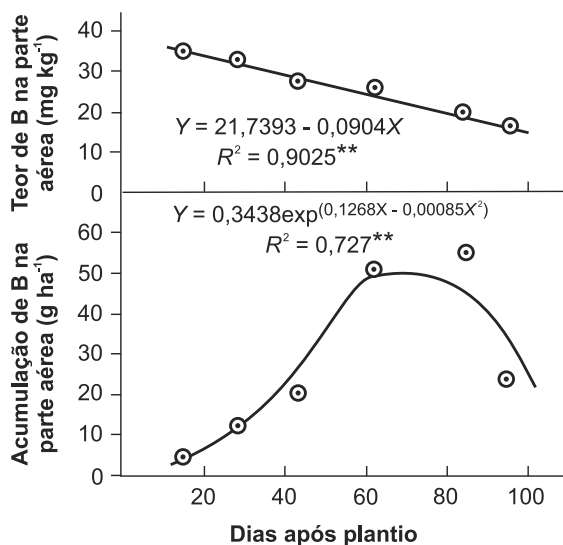


**Figura 10.** Teor e acumulação de boro (B) na parte aérea durante o ciclo do feijoeiro.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

## EFICIÊNCIA DE USO E ÍNDICE DE COLHEITA DE BORO

A eficiência do uso de B é um bom indicador do consumo desse nutriente pela cultura sob determinadas condições agroecológicas. Da mesma forma, o índice de colheita de B (quantidade de B acumulada nos grãos/quantidade de B acumulada na parte aérea e nos grãos) também

é um importante indicador da distribuição de B na parte aérea e nos grãos. Os dados de eficiência de uso do B durante o ciclo da cultura do feijoeiro, apresentados na Tabela 1, revelam que a eficiência foi significativamente afetada pela idade da planta e seguiu um modelo exponencial quadrático. A variabilidade na eficiência de uso do B em função da idade da planta foi de 97%, o que mostra a importância da correlação entre esses fatores. A eficiência de uso do B foi maior nos grãos em comparação com a parte aérea (Tabela 1).

**Tabela 1.** A eficiência de uso do boro (EUB) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro.

| Idade de planta (dia)                                                                                               | EUB (kg g <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 15                                                                                                                  | 53,6                                     |
| 29                                                                                                                  | 53,1                                     |
| 43                                                                                                                  | 53,6                                     |
| 62                                                                                                                  | 65,5                                     |
| 84                                                                                                                  | 73,1                                     |
| 96 (colheita), na parte aérea                                                                                       | 81,9                                     |
| 96 (colheita), nos grãos                                                                                            | 138,2                                    |
| <b>Análise de regressão</b>                                                                                         |                                          |
| Idade (X) vs. EUB na parte aérea (Y) = 52,7482 exp. (-0,0011 X + 0,000061 X <sup>2</sup> ), R <sup>2</sup> = 0,97** |                                          |

$$^{(1)} EUB \text{ (kg g}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Massa seca da parte aérea ou grãos (em kg)}}{\text{Acumulação de B na parte aérea ou nos grãos (em g)}}$$

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

Os índices de colheita de B em várias culturas anuais são apresentados na Tabela 2. O índice de colheita de B é maior em leguminosas do que em cereais (ou seja, a maior parte da translocação de B para os grãos ocorre em leguminosas em comparação com os cereais), o que mostra a maior importância das leguminosas no fornecimento desse nutriente para a nutrição humana.



**Tabela 2.** Índice de colheita de boro (ICB) em culturas anuais.

| Cultura               | Acúmulo de B na parte aérea (g ha <sup>-1</sup> ) | Acúmulo de B nos grãos (g ha <sup>-1</sup> ) | Total  | ICB <sup>(1)</sup> (%) |
|-----------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------|------------------------|
| Feijão                | 19,74                                             | 13,94                                        | 33,68  | 41                     |
| Arroz de terras altas | 53,05                                             | 29,52                                        | 82,57  | 36                     |
| Milho                 | 103,12                                            | 42,62                                        | 142,75 | 29                     |
| Soja                  | 22,35                                             | 20,46                                        | 42,80  | 48                     |

<sup>(1)</sup> ICB (%) = *Acúmulo de B nos grãos* / *acúmulo de B nos grãos + parte aérea*

Fonte: Fageria (2009).

## INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

A interação de nutrientes é um dos fatores que determina sua absorção e, consequentemente, a produtividade das culturas. Interação positiva foi relatada entre B, K e nitrogênio (N) (FAGERIA et al., 2002a; MORAGHAN; MASCAGNI, 1991). Altas doses de B reduzem a absorção de Zn, Fe e Mn (FAGERIA et al., 2002a), e altas doses de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) reduzem a absorção de B. A deficiência de Zn aumenta a absorção de B (GRAHAM et al., 1987). Baixo teor de P aumenta a toxicidade de B, e P em quantidade adequada reduz a toxicidade desse elemento (FAGERIA, 2009).

## CORREÇÃO DA DEFICIÊNCIA

As principais fontes de B usadas na correção de sua deficiência nas culturas são apresentadas na Tabela 3.

Para a recomendação de adubação, são necessários ensaios de campo e de casa de vegetação para verificar se a cultura responde à aplicação de um dado nutriente em um determinado solo. Fageria (2000) conduziu ensaios em casa de vegetação e campo para avaliar a resposta do feijoeiro e de outras culturas anuais à aplicação de B (Figura 11 e Tabela 4). O cálculo da dose adequada de B foi baseado na equação de regressão quadrática, em que o coeficiente de regressão  $b_1$  foi positivo. No caso em que a equação de regressão mostrou coeficiente  $b_1$  negativo, o valor original de B no solo foi considerado adequado, como no caso do arroz e do trigo. O nível tóxico de B foi calculado com base em 10%

**Tabela 3.** Principais fontes de boro (B).

| Fonte                                                                                                | Teor de B (%) <sup>(1)</sup> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )                                                             | 17                           |
| Bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )                               | 11                           |
| Tetraborato de sódio ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )                                           | 20                           |
| Pentaborato de sódio ( $\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )          | 18                           |
| Tetraborato de sódio penta-hidratado ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) | 14                           |
| Fritas de boro                                                                                       | 10–17                        |

<sup>(1)</sup> Valores aproximados.

Fonte: Fageria (2009).

de redução da produção relativa após atingir o nível máximo. No caso do arroz, a dose adequada foi 0,4 mg de B kg<sup>-1</sup>, e a dose tóxica foi de 3 mg de B kg<sup>-1</sup> (Figura 11). Para a cultura do feijão, a dose adequada foi de 2 mg de B kg<sup>-1</sup>, e a tóxica foi de 4,4 mg de B kg<sup>-1</sup>. No caso do milho, a dose adequada foi de 4,7 mg de B kg<sup>-1</sup>, e a tóxica foi de 8,7 mg de B kg<sup>-1</sup>. A produção máxima de soja foi obtida com a aplicação de 3,4 mg de B kg<sup>-1</sup>; a dose tóxica para essa cultura foi de 6,8 mg de B kg<sup>-1</sup>. Para o trigo, a dose adequada foi de 0,4 mg de B kg<sup>-1</sup>, e a tóxica foi de 7,4 mg de B kg<sup>-1</sup>. Com isso, verifica-se que as gramíneas, como arroz e trigo, são mais eficientes no uso de B para o crescimento do que as leguminosas, como feijão e soja. Gupta et al. (1985) relataram que, em geral, as plantas gramíneas necessitam de menos B do que as leguminosas.

Em ensaio de campo, a aplicação de B aumentou significativamente a produtividade do feijoeiro (Tabela 4). Baseada na equação de regressão, a produtividade máxima foi obtida com a aplicação de 3,6 kg de B ha<sup>-1</sup>. O pH do solo após a colheita de três ensaios foi de 6,7 (FAGERIA et al., 2007). Quando o pH é alto, a dose de B necessária para a cultura também é alta graças à adsorção de B (BARBER, 1995; SAKAL; SINGH, 1995). Fageria et al. (2011) relataram que a deficiência de B na maioria dos solos pode ser corrigida com a aplicação de 1 kg de B ha<sup>-1</sup> a 3 kg de B ha<sup>-1</sup> para as culturas anuais. Martens e Westermann (1991) também relataram que as doses adequadas para corrigir a deficiência de B nas culturas anuais situam-se na faixa de 1,7 kg de B ha<sup>-1</sup> a 3,4 kg de B ha<sup>-1</sup>. Entretanto, em solo de várzea tropical com 0,4 mg de B kg<sup>-1</sup>, Santos et al. (1999b) verificaram que o B foi tóxico ao feijoeiro reduzindo em 69 kg de grãos ha<sup>-1</sup> para

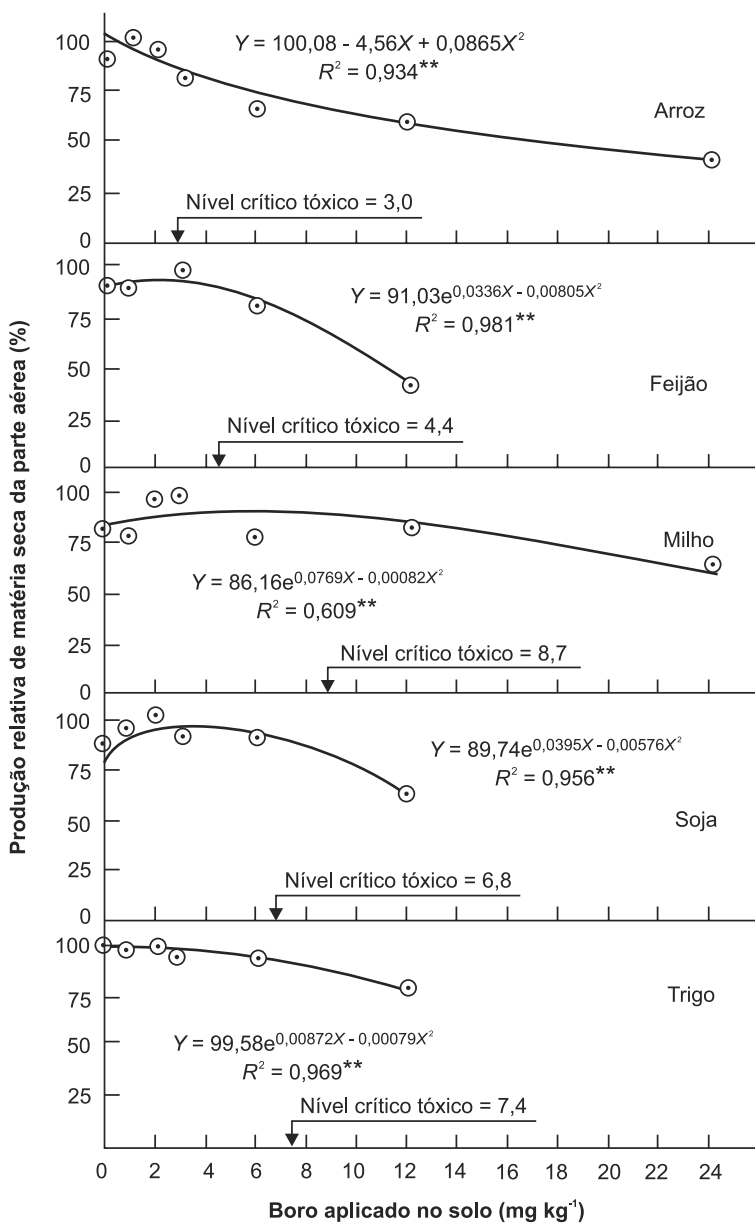


**Figura 11.** Resposta das culturas à aplicação de B em solo de Cerrado.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2000a).

cada kg de B aplicado, o que indica que a área experimental possui nível adequado desse micronutriente e que a adição de B torna-se prejudicial ao desempenho da cultivar Jalo Precoce de feijoeiro.

**Tabela 4.** Resposta do feijoeiro à aplicação de B em solo de Cerrado.

| Dose de B (kg ha <sup>-1</sup> )                                                                           | Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> ) |        |        |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|-------|
|                                                                                                            | 1º ano                               | 2º ano | 3º ano | Média |
| 0                                                                                                          | 3.852                                | 3.295  | 2.185  | 3.111 |
| 2                                                                                                          | 4.024                                | 3.432  | 2.151  | 3.203 |
| 4                                                                                                          | 4.140                                | 3.556  | 2.364  | 3.353 |
| 8                                                                                                          | 3.979                                | 3.475  | 2.250  | 3.232 |
| 16                                                                                                         | 3.488                                | 3.448  | 2.185  | 3.041 |
| 24                                                                                                         | 2.825                                | 3.472  | 2.368  | 2.888 |
| <b>Teste F</b>                                                                                             |                                      |        |        |       |
| Ano (A)                                                                                                    |                                      |        | **     |       |
| Boro (B)                                                                                                   |                                      |        | **     |       |
| A versus B                                                                                                 |                                      |        | **     |       |
| CV <sup>(1)</sup> (%)                                                                                      |                                      |        | 9,8    |       |
| <b>Análise de Regressão</b>                                                                                |                                      |        |        |       |
| Dose de B (X) vs. Produção de grãos (Y) = 4099,87 + 9,91 X – 1,39 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,69** |                                      |        |        |       |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2007).

A deficiência de B pode ser corrigida por via foliar, sendo suficiente a aplicação de 1 kg de B em 500 L de água ha<sup>-1</sup> a 2 kg de B em 500 L de água ha<sup>-1</sup>. Se a deficiência for severa, há necessidade de mais de uma aplicação.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As faixas de deficiência e de toxicidade de B para as plantas são pequenas em comparação com as dos outros micronutrientes. Os fatores

do solo que influenciam sua disponibilidade para as plantas são: pH, textura, umidade, temperatura, teor de matéria orgânica e mineralogia da argila. O processo de absorção de B pelas plantas é passivo e não metabólico. Isso significa que, na absorção de B, não é necessária energia metabólica da planta. Portanto, a taxa de absorção depende da sua concentração no solo e da absorção e transpiração de água. O melhor índice de disponibilidade de B é o teor de B extraído com água quente. O B é importante na formação dos grãos e é imóvel na planta. Portanto, é importante sua disponibilidade durante todo o ciclo da cultura para se obter melhores produtividades. O teor de B em torno de  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo é considerado adequado para a cultura do feijoeiro em solos de Cerrado e várzea. A aplicação de  $4 \text{ kg de B ha}^{-1}$  no sulco é suficiente para corrigir sua deficiência quando o pH é maior do que 6,0 em água. Em comparação aos grãos, a palha acumula a maior parte do B.

## Capítulo 11

# Cobre

## INTRODUÇÃO

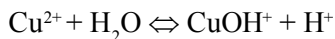
A descoberta da essencialidade do cobre (Cu) para as plantas ocorreu no ano de 1931 (FAGERIA et al., 2011). A quantidade de Cu absorvida pelas culturas anuais somente é maior do que a de molibdênio (Mo), sendo, às vezes, semelhante à do boro (B). O teor de Cu nas plantas situa-se geralmente na faixa de  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  (FAGERIA, 2009). Conforme Fageria et al. (1999, 2002) e Fageria e Stone (2008), a deficiência de Cu é mais comum em solos orgânicos (relacionada com a formação de complexos com a matéria orgânica) e arenosos (relacionada com a lixiviação do Cu). Além disso, a deficiência de Cu pode ocorrer após a aplicação de calcário em solos com pH muito elevado e após uso abundante de fertilizantes sem micronutrientes em solos cultivados com muita intensidade (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2002). As terras turfo-sas também podem apresentar deficiência de Cu. Sintomas de deficiência de Cu têm sido relatados em diversas culturas em várias regiões do Brasil (LOPES; ABREU, 2000; NASCIMENTO; FONTES, 2004). Nascimento (2001) relatou que, em Latossolos, a deficiência pode ser atribuída à pequena reserva natural desse micronutriente e à sua baixa disponibilidade (o Cu se encontra predominantemente nas formas oxídica e residual, não disponíveis às plantas).

A absorção de Cu está relacionada com o metabolismo das plantas e é fortemente inibida por outros cátions bivalentes, como o zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ). A aplicação de altas doses de nitrogênio (N) e fósforo (P) induz a deficiência de Cu em solos com baixo teor desse elemento. Essa deficiência pode estar relacionada com o rápido crescimento da planta após a aplicação de N e P e com o fato de o teor de Cu no solo não ser suficiente para o suprimento da demanda da planta (MENGEL et al., 2001).

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

A disponibilidade de Cu para as plantas é influenciada por vários fatores, como pH, teor de matéria orgânica, composição mineralógica, textura e competição com outros nutrientes na solução do solo (NASCIMENTO; FONTES, 2004). A concentração de Cu na solução do solo é geralmente baixa, na faixa de  $10^{-8} \text{ M}$  a  $10^{-6} \text{ M}$  (de 0,6 ppb a 63 ppb) (TISDALE et al., 1985). O íon predominante sob pH abaixo de 6,9 é o

$\text{Cu}^{2+}$ , enquanto o  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  é a espécie mais abundante na solução do solo acima desse pH (LINDSAY, 1979). O Cu da solução de solo forma complexos com a matéria orgânica solúvel quando o pH é maior do que 6,6 (BARBER, 1995). A hidrólise do Cu segue as seguintes reações:



Considerando que a solubilidade do Cu no solo é altamente dependente do pH, constatou-se que, com o aumento de uma unidade no pH do solo, a concentração de Cu diminui 100 vezes (TISDALE et al., 1985). Observa-se, na Figura 1, que o teor de Cu na parte aérea do feijoeiro diminui com o aumento do pH na faixa de 5,0 a 7,0 em solo de várzea. Na Tabela 1, são apresentados resultados do teor de Cu em solo de várzea sob diferentes pHs. O teor de Cu no solo começou a diminuir quando o pH aumentou acima de 5,9. Com o aumento do pH para 7, o teor de Cu diminuiu 48% em comparação ao teor sob pH 5,9.

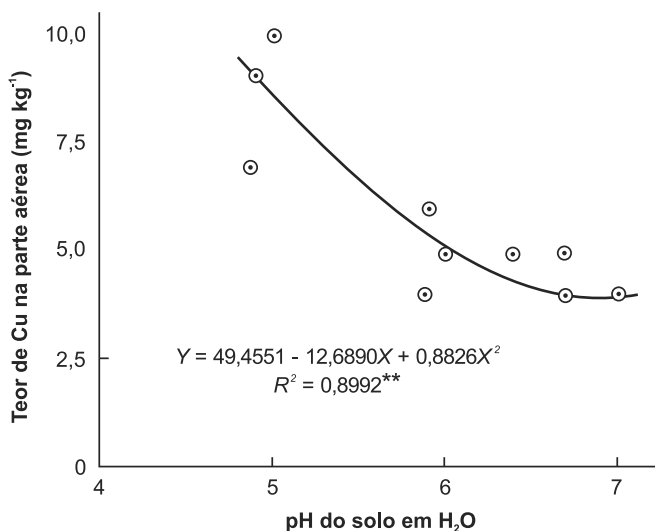


**Figura 1.** Influência do pH do solo no teor de Cu na parte aérea do feijoeiro.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2006a).



**Tabela 1.** Teor de cobre (Cu) sob diferentes pHs em solo de várzea.

| pH em água | Teor de Cu (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|------------|-----------------------------------|
| 4,9        | 6,3                               |
| 5,9        | 6,3                               |
| 6,4        | 5,8                               |
| 6,7        | 5,0                               |
| 7,0        | 3,3                               |

Fonte: Fageria e Baligar (1999).

A diminuição no teor de Cu com o aumento do pH está relacionada com a diminuição da sua concentração na solução do solo e sua adsorção aos coloides do solo (FAGERIA et al., 2003b). O Cu, que é imóvel no solo, geralmente é encontrado em altos teores na camada superficial. Em arroz irrigado, a disponibilidade de Cu diminui com a inundação graças à precipitação do Cu como hidróxido com o aumento do pH em solos ácidos. A taxa de diminuição, que estava significativamente relacionada com o aumento do pH, foi maior aos 30 dias após a inundação do que aos 90 dias (PATEL; SINGH, 1995).

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

O Cu não é facilmente translocável na planta. Portanto, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas mais novas ou nos pontos de crescimento novos (FAGERIA et al., 1996; FOTH; ELLIS, 1988). As plantas com carência de Cu mostram coloração verde-escura, com enrugamento das bordas e encurvamento da ponta do limbo para baixo (FAGERIA et al., 1996). O crescimento de plantas de feijoeiro aumentou com a aplicação de 2 mg de Cu kg<sup>-1</sup> a 4 mg de Cu kg<sup>-1</sup> de solo em comparação com a testemunha (Figura 2). No entanto, a aplicação de 64 mg de Cu kg<sup>-1</sup> de solo diminuiu o crescimento das plantas, o que mostra a toxidez desse elemento (Figura 2). Uma discussão mais ampla dos sintomas de deficiência de Cu nas plantas de feijoeiro, incluindo fotografias coloridas, foi feita por vários autores (FAGERIA et al., 1996; OLIVEIRA et al., 1996; WALLACE, 1961; WILCOX; FAGERIA, 1976). Relevante lembrar, no

entanto, que existem diferenças significativas entre espécies e genótipos da mesma espécie com relação à deficiência de Cu (TISDALE et al., 1985).

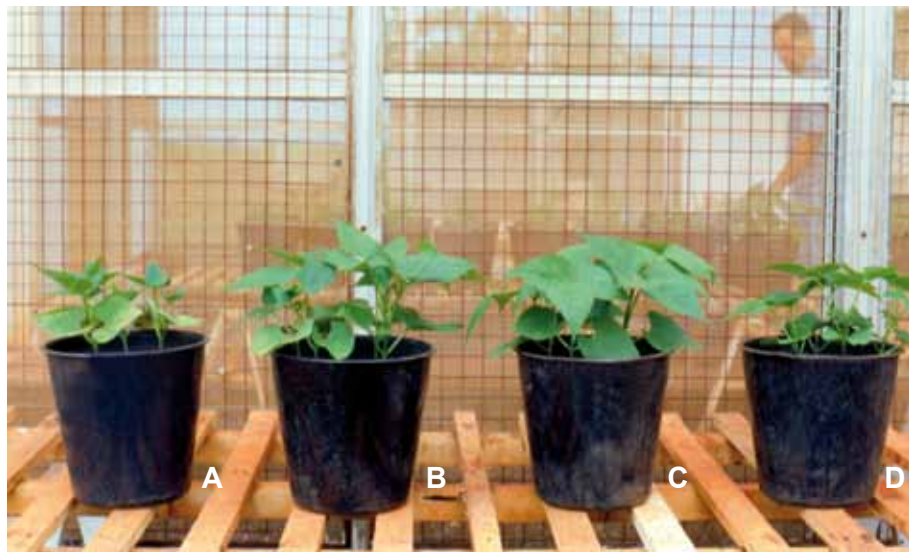


Foto: Sebastião Araújo

**Figura 2.** Resposta do feijoeiro à aplicação de Cu em solo de Cerrado. As doses de Cu foram 0 (A), 2 mg kg<sup>-1</sup> de solo (B), 4 mg kg<sup>-1</sup> de solo (C) e 64 mg kg<sup>-1</sup> de solo (D).

Fonte: Fageria (2009).

## FUNÇÕES

A maioria das funções do Cu como nutriente de plantas é baseada na sua participação enzimática nas reações de redução (FAGERIA, 2009; MARSCHNER, 1995). Além disso, o Cu exerce papéis importantes nas funções bioquímicas da planta (FAGERIA et al., 2003b):

- É essencial na formação da clorofila.
- Catalisa vários processos bioquímicos.
- É ativador de várias enzimas.
- Participa do metabolismo de proteínas e carboidratos.
- É necessário para a fixação biológica do N<sub>2</sub>.

A deficiência de Cu diminui a atividade da enzima fenolase e, conseqüentemente, diminui a floração e a produtividade. Também induz

uma mudança típica anatômica (a inibição da lignificação da parede celular), tem influência na formação dos grãos e pode ocasionar a inibição da translocação de Ca para órgãos novos das plantas. Além disso, reduz o crescimento do sistema radicular da planta. Observa-se, na Tabela 2, que o comprimento máximo das raízes do feijoeiro aumentou de maneira quadrática com a adição de Cu na faixa de 0 a 96 mg kg<sup>-1</sup> em solo de Cerrado.

**Tabela 2.** Influência do cobre (Cu) no comprimento do sistema radicular do feijoeiro.

| Dose de Cu (mg kg <sup>-1</sup> )                                                                                 | Comprimento máximo das raízes (cm) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 0                                                                                                                 | 25                                 |
| 2                                                                                                                 | 30                                 |
| 4                                                                                                                 | 27                                 |
| 8                                                                                                                 | 28                                 |
| 16                                                                                                                | 28                                 |
| 32                                                                                                                | 24                                 |
| 64                                                                                                                | 30                                 |
| 96                                                                                                                | 14                                 |
| <b>Análise de Regressão</b>                                                                                       |                                    |
| Dose de Cu (X) vs. Matéria seca das raízes (Y) = 26,13 + 0,16 X – 0,0029 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,42** |                                    |

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria (2002a).

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NO SOLO

O conhecimento dos teores adequado e tóxico de Cu no solo é fundamental para o diagnóstico de suficiência, deficiência ou toxicidade desse elemento. Teores adequados e tóxicos de Cu em solo de Cerrado em relação à produção relativa da parte aérea, utilizando-se o extrator Mehlich 1, foram determinados para várias culturas anuais (Figura 3). Com o aumento do teor de Cu no solo, as culturas de arroz de terras altas, feijão, milho e trigo mostraram resposta significativa e quadrática, ao contrário

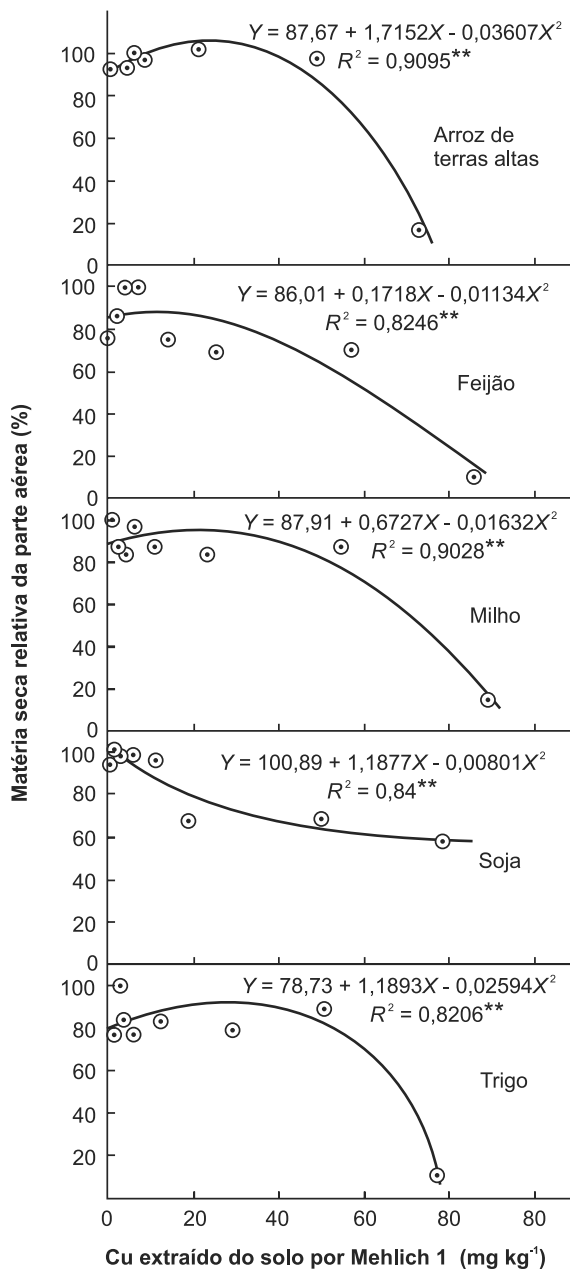


**Figura 3.** Relação entre o Cu extraído do solo pelo extrator Mehlich 1 e a produção relativa de culturas anuais.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2001a).

da soja, cuja produção relativa diminuiu. Com base em 90% de produção relativa, os teores adequados de Cu no solo, com o uso do extrator Mehlich 1, foram de 2 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz de terras altas, 1,5 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 2,5 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 1 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 10 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Quando o extrator de ácido dietilenotriaminopentacético + trietanolamina (DTPA-TEA) foi usado, os níveis adequados de Cu no solo foram de 1 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz de terras altas, 0,5 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 1,5 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 0,5 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 8,5 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo (FAGERIA, 2001a). Os teores tóxicos de Cu no solo, pelo extrator Mehlich 1, baseados em 10% de redução da produção relativa após atingir o nível máximo, foram de 48 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz de terras altas, 35 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 45 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 10 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 52 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo (FAGERIA, 2001a). Pelo extrator DTPA-TEA, os teores tóxicos de Cu foram de 28 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz de terras altas, 18 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 32 mg kg<sup>-1</sup> para o milho, 6 mg kg<sup>-1</sup> para a soja e 28 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo (FAGERIA, 2001a).

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NA PLANTA

Fageria (2001a) e Fageria et al. (2011) determinaram os teores adequado e tóxico de Cu nas culturas de feijão, arroz, milho, soja e trigo com base em 90% de produção relativa da parte aérea. Os teores adequados foram de 15 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz de terras altas, 6 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 7 mg kg<sup>-1</sup> para o milho e a soja e 14 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Os níveis tóxicos, que foram determinados com base em 10% de redução na produção relativa após atingir o nível máximo, foram de 26 mg kg<sup>-1</sup> para o arroz de terras altas, 10 mg kg<sup>-1</sup> para o feijão, 11 mg kg<sup>-1</sup> para o milho e a soja e 17 mg kg<sup>-1</sup> para o trigo. Esses resultados sugerem que tanto os níveis adequados como os tóxicos de Cu variam bastante de espécie para espécie.

O nível crítico de Cu na parte aérea das culturas anuais situa-se na faixa de 3 mg kg<sup>-1</sup> a 5 mg kg<sup>-1</sup>, e o nível crítico tóxico na faixa de 20 mg kg<sup>-1</sup> a 30 mg kg<sup>-1</sup> (MARSCHNER, 1995; ROBSON; REUTER, 1981). Follett et al. (1981) relataram que o teor de Cu nas culturas anuais situa-se na faixa de 3 mg kg<sup>-1</sup> a 50 mg kg<sup>-1</sup>, e a concentração suficiente está na faixa de 6 mg kg<sup>-1</sup> a 11 mg kg<sup>-1</sup>. Já Stevenson (1986) relatou que o teor de Cu nos tecidos das culturas anuais varia na faixa de 3 mg kg<sup>-1</sup> a 40 mg kg<sup>-1</sup>, dependendo do solo e da espécie de planta, e a toxidez de Cu ocorre quando o seu teor na parte aérea é maior do que 20 mg kg<sup>-1</sup>.

## TEOR E ACUMULAÇÃO NA PLANTA DURANTE O CICLO DA CULTURA

A absorção de Cu, assim como sua utilização pelas plantas, é um processo ativo que requer energia. A taxa de absorção de Cu é mais baixa do que a da maioria dos micronutrientes, com exceção da do Mo. A maioria das espécies de plantas contém menos de 10 mg de Cu kg<sup>-1</sup> de matéria seca (BARBER, 1995). Em trabalho realizado em solo de Cerrado, determinaram-se o teor e a acumulação de Cu na parte aérea de uma cultivar de feijoeiro durante o ciclo da cultura (Figura 4). O teor de Cu na parte aérea diminuiu com a idade da planta graças ao aumento da matéria seca (trata-se do chamado “efeito de diluição”). A acumulação de Cu aumentou com a idade de planta e diminuiu na colheita (o que está relacionado com a translocação de Cu para os grãos). Para produzir 1 tonelada de grãos, a cultura do feijoeiro acumula 16 g de Cu ha<sup>-1</sup> na palha e nos grãos (FAGERIA; STONE, 2008).

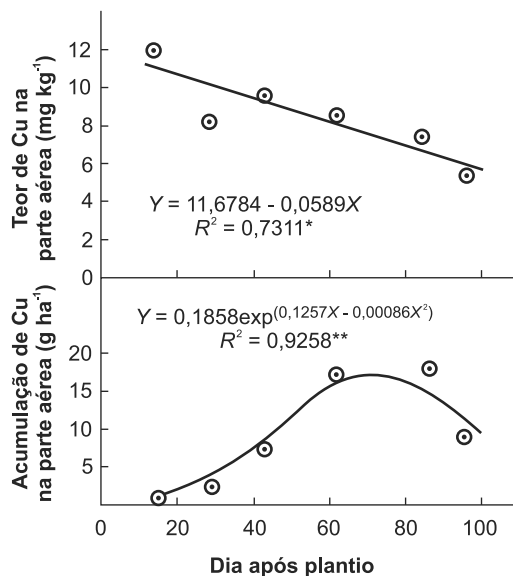


**Figura 4.** Teor e acumulação de cobre (Cu) durante o ciclo da cultura do feijoeiro.

\* Significativo a 5% de probabilidade.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

## EFICIÊNCIA DE USO DO COBRE

A eficiência de uso do Cu (massa da matéria seca da parte aérea ou produção de grãos/acumulação de Cu na parte aérea ou nos grãos) pelo feijoeiro durante o ciclo, apresentada na Tabela 3, tem uma relação quadrática com a idade da planta. Existem diferenças entre espécies e cultivares da mesma espécie na absorção e utilização do Cu (PATEL; SINGH, 1995). Na Tabela 4, estão relacionadas as culturas anuais suscetíveis à deficiência de Cu.

**Tabela 3.** Eficiência de uso do cobre (EUCu) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro.

| Idade da planta (dias)                                                                             | EUCu (kg g <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 15                                                                                                 | 84,5                       |
| 29                                                                                                 | 125,8                      |
| 43                                                                                                 | 103,5                      |
| 62                                                                                                 | 120,9                      |
| 84                                                                                                 | 135,7                      |
| 96                                                                                                 | 216,2                      |
| 96 (nos grãos)                                                                                     | 85,3                       |
| <b>Análise de Regressão</b>                                                                        |                            |
| Idade da planta (X) vs. EUCu (Y) = 7,03 + 2,77 X – 0,0108 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,93** |                            |

\*\*Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

**Tabela 4.** Suscetibilidade relativa das culturas à deficiência de cobre (Cu).

| Suscetibilidade alta | Suscetibilidade média | Suscetibilidade baixa |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Alfafa               | Cevada                | Feijão                |
| Aveia                | Algodão               | Ervilha               |
| Cebola               | Milho                 | Soja                  |
| Arroz                | Sorgo                 | Gramíneas forrageiras |
| Trigo                |                       | Batata                |
| Beterraba            |                       |                       |

Fonte: Fageria et al. (2003b).

## INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

O equilíbrio nutricional é um fator importante no aumento e/ou na sustentação da produtividade das culturas. O excesso de um dado nutriente cria desequilíbrio no processo de absorção e utilização dos outros nutrientes, o que influencia a produtividade. Sabe-se que há interação negativa entre P e Cu nas culturas anuais e que o uso prolongado de P em excesso resulta em deficiência de Cu (FOLLETT et al., 1981). O mecanismo da interação entre P e Cu não é bem conhecido, mas o problema está relacionado com o processo fisiológico e nutricional e não com a precipitação no solo (FOLLETT et al., 1981). Também são relatadas interações negativas entre Mo e Cu e entre Zn e Cu (FOLLETT et al., 1981). Isso significa que o aumento de um no meio de crescimento diminui a absorção do outro. Em solo de várzea tropical com 2,3 mg de Cu kg<sup>-1</sup> de solo, Santos et al. (1999b) não verificaram efeitos da interação entre os micronutrientes B e Cu nem o efeito de doses de Cu (zero, 2 kg ha<sup>-1</sup>, 5 kg ha<sup>-1</sup>, 5 kg ha<sup>-1</sup> e 10 kg ha<sup>-1</sup>) sobre o desempenho da cultivar Jalo Precoce de feijoeiro. Quando existe interação negativa entre dois nutrientes, a solução é aumentar a quantidade daquele que está em menor concentração. A interação negativa entre dois nutrientes tem um valor mínimo ou crítico, acima do qual começa a diminuir a produtividade das culturas. Portanto, o conhecimento do valor crítico da interação é importante para corrigir o processo negativo da interação entre nutrientes.

## RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO COM COBRE

A deficiência de Cu nas plantas pode ser corrigida com sua aplicação no solo, a lanço ou no sulco, ou com aplicação via foliar. O primeiro é o melhor método; esse último deve ser usado somente em caso de emergência. De acordo com Martens e Westermann (1991), a deficiência de Cu é geralmente corrigida com a aplicação a lanço de 3 kg de Cu ha<sup>-1</sup> a 15 kg de Cu ha<sup>-1</sup> na forma de CuSO<sub>4</sub>, variação que se justifica pelas propriedades do solo, pela necessidade da planta e pela concentração do Cu extraível no solo. Ainda segundo Martens e Westermann (1991), a aplicação de Cu no sulco pode ser desde 1 kg ha<sup>-1</sup>, para as culturas menos exigentes, até 7 kg ha<sup>-1</sup>, para as culturas altamente sensíveis. Follett et al. (1981) recomendaram a aplicação de 1 kg de Cu ha<sup>-1</sup> a 7 kg



de  $\text{Cu ha}^{-1}$  no sulco e 4 kg de  $\text{Cu ha}^{-1}$  a 14 kg de  $\text{Cu ha}^{-1}$  a lanço na forma de  $\text{CuSO}_4$  para as culturas anuais. O efeito residual do Cu é prolongado; portanto, é recomendável a sua aplicação no solo (FOLLETT et al., 1981). Para corrigir a deficiência em solos orgânicos, é necessária maior dose de Cu do que em solos minerais. Mengel et al. (2001) recomendaram a aplicação de 2 kg de Cu (na forma de  $\text{CuSO}_4$ ) em 280 L de água  $\text{ha}^{-1}$  para corrigir a deficiência em culturas anuais. Às vezes, a aplicação foliar precisa ser repetida mais de uma vez, dependendo da severidade da deficiência.

Fageria (2001a) estudou a necessidade de Cu nas culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo em casa de vegetação (Figura 5). Considerando 90% da produção relativa de matéria seca como parâmetro de determinação das doses adequadas de Cu, recomenda-se a aplicação de 3  $\text{mg kg}^{-1}$  para o arroz de terras altas, 2  $\text{mg kg}^{-1}$  para o feijão, 3  $\text{mg kg}^{-1}$  para o milho e 12  $\text{mg kg}^{-1}$  para o trigo. A soja não respondeu à aplicação de Cu.

Existem várias fontes de Cu que podem ser utilizadas na correção da deficiência desse elemento (Tabela 5), sendo o  $\text{CuSO}_4$  penta-hidratado a mais comumente usada graças à sua maior solubilidade em água e à disponibilidade do elemento para as plantas. Além disso, o  $\text{CuSO}_4$  está disponível na forma cristalina, o que facilita a sua mistura com fertilizantes.

**Tabela 5.** Principais fontes de cobre (Cu) que podem ser usadas como fertilizantes.

| Fonte                                                                          | Teor de Cu (%) |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Sulfato de cobre mono-hidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )   | 35             |
| Sulfato de cobre penta-hidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) | 24             |
| Óxido de cobre ( $\text{CuO}$ )                                                | 75             |
| Quelato de cobre ( $\text{Na}_2\text{Cu-EDTA}$ )                               | 13             |
| Quelato de cobre ( $\text{NaCu-EDTA}$ )                                        | 9              |

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2002).

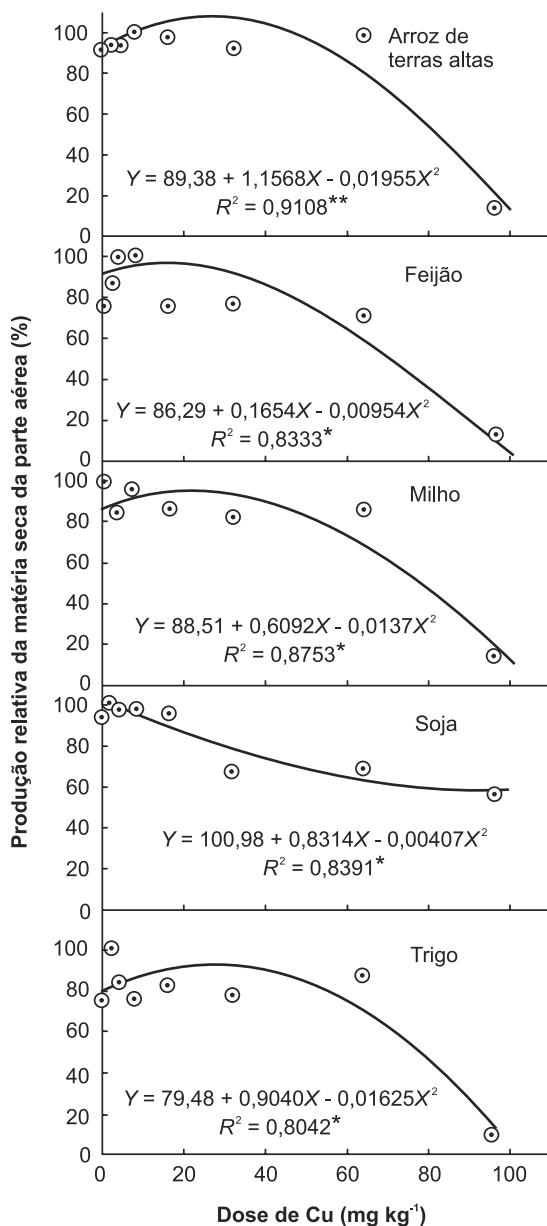


**Figura 5.** Relação entre cobre (Cu) aplicado no solo e produção relativa de matéria seca da parte aérea das culturas de arroz de terras altas, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado.

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2001a).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deficiência de Cu é mais comum em solos com baixo teor desse nutriente, em solos orgânicos (graças à formação de complexos com a matéria orgânica), em solos arenosos e em solos ácidos (onde o calcário foi aplicado em excesso). Os principais fatores que influenciam a disponibilidade do Cu para as plantas são o pH do solo, o teor de matéria orgânica, a textura e as interações com outros nutrientes. A dose de Cu recomendada está na faixa de  $1 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $10 \text{ kg ha}^{-1}$ , dependendo do grau da deficiência, do pH do solo e do método de aplicação. A aplicação a lanço requer doses duas ou três vezes maiores do que as da aplicação no sulco. O  $\text{CuSO}_4$  é a fonte mais comum graças à sua solubilidade em água. O efeito residual do Cu é prolongado; portanto, não é necessária a aplicação todos os anos. Entretanto, é preciso acompanhar os dados de análise do solo para determinar a quantidade de reaplicação. O nível crítico de Cu no solo está na faixa de  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , dependendo do solo e do extrator usado. Nas plantas, o teor em torno de  $6 \text{ mg de Cu kg}^{-1}$  de matéria seca pode ser considerado como nível crítico para a cultura do feijoeiro.

## Capítulo 12

# **Manganês**

## INTRODUÇÃO

O manganês (Mn) é o segundo micronutriente mais abundante no solo; fica atrás apenas do ferro (Fe) (LAVRES JUNIOR et al., 2008). No mundo, encontram-se teores que variam de 20 mg de Mn kg<sup>-1</sup> de solo a 3.000 mg de Mn kg<sup>-1</sup> de solo, e a disponibilidade aumenta com a diminuição do pH do solo (ADRIANO, 2001; KABATA-PENDIAS, 2000). Nos solos brasileiros, a ocorrência de Mn é predominantemente pedogênica (BORKERT et al., 2001), com teores disponíveis que variam de 3 mg de Mn kg<sup>-1</sup> a 190 mg de Mn kg<sup>-1</sup> nos horizontes superficiais dos solos (CARDOSO et al., 2003). O Mn participa em vários processos bioquímicos da planta, como a formação de clorofila e a estimulação de enzimas respiratórias, e aumenta a absorção de fósforo (P) e cálcio (Ca) (FAGERIA, 2001a; TAIZ; ZEIGER, 2004). O Mn desempenha papel fundamental na elongação celular, e sua deficiência pode inibir a síntese de lipídios ou metabólitos secundários, como o ácido giberélico e os isoprenoides (MALAVOLTA et al., 1997). Além disso, o Mn está relacionado à formação da lignina (MARSCHNER, 1995), presente na parede celular, à qual confere menor permeabilidade, exercendo, assim, efeito significativo sobre a capacidade e a velocidade de absorção de água através do tegumento das sementes (FERNANDES et al., 2007). Segundo Mann et al. (2002), Melarato et al. (2002) e Teixeira et al. (2005), sementes com baixo teor de lignina no tegumento apresentam menor vigor, o que pode estar relacionado à deficiência de Mn. Nesse sentido, o fornecimento adequado e equilibrado de nutrientes para o feijoeiro pode contribuir não só para aumentar a produtividade, mas também para melhorar a qualidade fisiológica das sementes (FERNANDES et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2004, 2005).

A deficiência de Mn ocorre em solos orgânicos, alcalinos e com textura arenosa, e em solos ácidos altamente intemperizados (se tiverem sido sujeitos à aplicação de altas doses de calcário) (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2002). Essa deficiência é geralmente associada com alto pH, mas também pode ocorrer quando existe desequilíbrio com outros nutrientes, como Ca, magnésio (Mg) e Fe (FAGERIA et al., 2002). Tanto a deficiência como a toxidez de Mn não são comuns em feijoeiro, embora a deficiência desse elemento tenha sido relatada em solos de Cerrado quando o pH do solo era maior do que 6,0 em água e o teor de Mn menor do que 8,0 mg kg<sup>-1</sup> de solo (FAGERIA, 2001a). Condições de solo, como

elevado pH e ambiente de oxidação, estimulam a formação de  $\text{MnO}_2$  e reduzem a disponibilidade de Mn para as plantas (CHRISTENSON et al., 2000; MARSCHNER, 1995; MENGEL et al., 2001). Oliveira Junior et al. (2000) relataram que a elevação do pH diminui a disponibilidade de Mn em decorrência da formação de hidróxidos e óxidos de Mn de baixa solubilidade. Malavolta e Kliemann (1985) e Lindsay (1979) relataram que, a cada unidade de pH que se eleva, a concentração de  $\text{Mn}^{2+}$  na solução diminui 100 vezes. Moraes et al. (1998) verificaram que, embora a prática da calagem tenha ocasionado decréscimo nos teores foliares de Mn no feijoeiro, esse efeito não foi observado no solo. Segundo os autores, é provável que a reação do calcário (que provoca aumento nos valores pH) tenha possibilitado a diminuição da forma solúvel ( $\text{Mn}^{2+}$ ) e o aumento das formas não absorvidas pelas plantas ( $\text{Mn}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{4+}$ ). Além disso, no Brasil, foram observados, pela análise de solo, baixos teores de Mn em alguns solos de várzea do Estado do Tocantins (FAGERIA et al., 2003b). Para Teixeira et al. (2004), apesar da alta tecnologia adotada pelos produtores no cultivo do feijoeiro irrigado, a nutrição mineral muitas vezes é negligenciada, principalmente em relação aos micronutrientes.

Oliveira et al. (1996) relataram que deficiência de Mn foi observada na cultura do feijoeiro principalmente em solos onde há utilização intensiva de técnicas agrícolas que promovem aumento na produtividade das culturas e retirada crescente do micronutriente sem adequada reposição e em solos submetidos à aplicação excessiva de calcário, o que causa indisponibilidade do nutriente para as plantas (MANN et al., 2002). Porém, mesmo em solos ácidos, em que os teores de Mn geralmente são elevados, pode ocorrer deficiência do nutriente (BORKERT et al., 2001), já que a absorção deste micronutriente pode ser diminuída, entre outros fatores, por altas concentrações de potássio (K), Ca, Mg, cobre (Cu), zinco (Zn) e Fe no meio (FAGERIA, 2001a). Rosolem e Nakagawa (1990) demonstraram que a deficiência de Mn em soja pode ser induzida pela calagem, principalmente quando acompanhada da aplicação de doses relativamente elevadas de K. A utilização intensiva de fosfatos no solo também contribui para a baixa disponibilidade do micronutriente (MASCARENHAS et al., 1996).

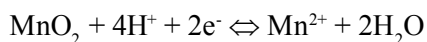
A disponibilidade de Mn muda de acordo com a valência ou forma de Mn – bivalente ( $\text{Mn}^{2+}$ ), trivalente ( $\text{Mn}^{3+}$ ) ou tetravalente ( $\text{Mn}^{4+}$ ) – no solo, que é alterada com o processo de oxidação e redução. Portanto, a deficiência ou o excesso de Mn nas plantas depende mais da sua forma

no sistema solo-planta e da interação com outros nutrientes do que da própria quantidade no solo (SHIMADA, 1995). Na cultura do feijoeiro, o baixo teor de Mn está associado com condições de alto pH e antagonismo com outros micronutrientes.

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O Mn na forma de compostos de  $Mn^{4+}$  e  $Mn^{3+}$  ocorre em solos oxidados, enquanto a forma  $Mn^{2+}$  é dominante em condições de redução. Os compostos de  $Mn^{4+}$  são muito pouco solúveis, e os de  $Mn^{3+}$  são muito instáveis na solução do solo. Portanto, a forma  $Mn^{2+}$  representa a única forma solúvel relevante de Mn na solução do solo. A difusão é importante mecanismo no transporte do Mn da solução do solo para as raízes das plantas no processo de absorção (TISDALE et al., 1985). A concentração de Mn na solução do solo aumenta sob baixo pH e sob condições de redução. A transformação de  $Mn^{4+}$  para  $Mn^{2+}$  ocorre quando o potencial de oxirredução está na faixa de 200 mV a 400 mV (TISDALE et al., 1985). Sob pH extremamente baixo, a concentração de  $Mn^{2+}$  pode aumentar, o que pode causar toxidez em espécies sensíveis.

A concentração de Mn na solução do solo é controlada principalmente pela reserva de Mn no solo, pelo pH e pela disponibilidade de elétrons ( $e^-$ ), como mostrado pela seguinte equação (ADAMS, 1981; SPARROW; UREN, 1987):



A dinâmica e a disponibilidade de Mn são determinadas por vários fatores, como pH, potencial de oxirredução, natureza e concentração de cátions e ânions, composição mineralógica das argilas e presença de microrganismos. A disponibilidade do Mn é alta em solos ácidos graças à maior solubilidade dos seus compostos sob baixo pH. Pode-se observar, na Figura 1, o teor de Mn na parte aérea do feijoeiro sob diferentes pHs em solo de Cerrado. Com o aumento do pH, o teor de Mn diminuiu significativamente: sob pH 5,0, o teor de Mn estava em torno de 4.300 mg  $kg^{-1}$ , e, quando o pH aumentou para 7,0, o teor diminuiu para 30 mg  $kg^{-1}$ . Fageria e Baligar (1999), Fageria et al. (1999, 2011) também relataram diminuição de Mn na planta com o aumento do pH em solos de Cerrado e várzea do Brasil.

Observa-se, na Tabela 1, a variação no teor de Mn no solo com a aplicação de doses de 0 a 100 mg  $kg^{-1}$  sob duas saturações por bases. Com

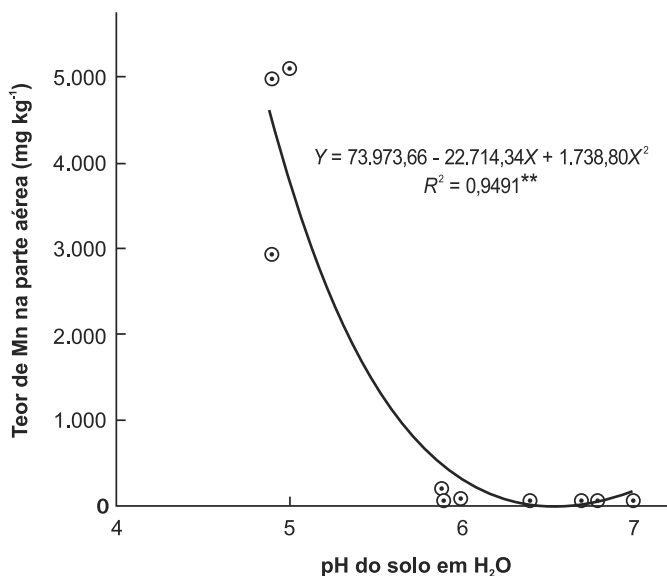


**Figura 1.** Relação entre pH do solo e teor de Mn na parte aérea do feijoeiro.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2006a).

**Tabela 1.** Influência de doses de Mn e saturação por bases no teor de Mn em um Oxissolo de Cerrado após a aplicação de fertilizantes. O Mn foi extraído com o extrator ácido dietilenotriaminopentacético + trietanolamina (DTPA-TEA).

| Dose de Mn<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | Saturação por bases |       |
|--------------------------------------|---------------------|-------|
|                                      | 50%                 | 70%   |
| 0                                    | 1,40                | 2,40  |
| 20                                   | 7,60                | 8,00  |
| 40                                   | 15,00               | 14,40 |
| 60                                   | 37,00               | 18,20 |
| 80                                   | 61,60               | 24,00 |
| 100                                  | 81,00               | 34,20 |
| Média                                | 39,93               | 16,87 |

Fonte: adaptado de Heinrichs et al. (2008).



a aplicação de Mn, o teor no solo aumentou, variando de 1,4 mg kg<sup>-1</sup> a 81,0 mg kg<sup>-1</sup> sob 50% de saturação por bases e de 2,4 mg kg<sup>-1</sup> a 34,2 mg kg<sup>-1</sup> sob 70% de saturação por bases. Na média, houve diminuição de 139% sob alta saturação por bases em comparação com os teores sob baixa saturação por bases. A diminuição do teor de Mn com o aumento da saturação por bases ou aumento do pH, relatada por Malavolta (1980) e Fageria (2009), ocorre graças à insolubilização do Mn como óxido (MnO<sub>2</sub>).

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

O Mn é imóvel na planta; portanto, a deficiência desse elemento começa nas folhas mais novas. Os sintomas de deficiência iniciam com clorose nas lâminas das folhas mais novas, que ficam com as nervuras proeminentes. São observadas linhas internervais amareladas medindo mais ou menos a mesma largura. Conforme a evolução da deficiência, o tecido internerval torna-se necrótico, de coloração amarronzada. Os sintomas de deficiência de Mn nas plantas de feijoeiro são apresentados com fotografias coloridas por Fageria et al. (1996), Wallace (1961) e Wilcox e Fageria (1976).

## FUNÇÕES

Mais de 60% do Mn nas plantas está contido nos cloroplastos das folhas. Este micronutriente, juntamente com o Fe e o Cu, exerce papel importante no sistema de transporte de elétrons (OBATA, 1995). Com a deficiência de Mn, o sistema de evolução do oxigênio (O<sub>2</sub>) é suprimido, e a estrutura do cloroplasto é decomposta (CHENIAE; MARTIN, 1971; OBATA, 1995).

Considerando suas funções na planta, o Mn<sup>2+</sup> se assemelha ao Mg<sup>2+</sup>. Os dois íons formam pontes entre o trifosfato de adenosina (ATP) e as enzimas transferidoras de grupos (fosfoquinases e fosfotransferases). No ciclo dos ácidos tricarboxílicos, operam descarboxilases e desidrogenases ativadas por Mn<sup>2+</sup>, embora, em algumas delas, o Mg<sup>2+</sup> possa substituí-lo. Outras enzimas exigem especificamente Mn (MALAVOLTA, 1980).

Fageria et al. (1999) assim resumiram as funções mais importantes do Mn na planta: 1) está indiretamente relacionado com a formação de clorofila; 2) é considerado constituinte de algumas enzimas respiratórias e

ativa várias reações metabólicas importantes; 3) acelera a germinação e a maturação; e 4) aumenta a disponibilidade de P e Ca.

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NO SOLO

Os teores adequado e tóxico de um elemento no solo ajudam a estabelecer as recomendações de adubação para uma determinada cultura com vistas a se obter máxima produtividade econômica. Fageria (2001a) determinou os teores adequado e tóxico de Mn no solo de Cerrado para as culturas de feijão, arroz de terras altas, milho, soja e trigo utilizando os extratores Mehlich 1 e ácido dietilenotriaminopentacético + trietanolamina (DTPA-TEA). Os resultados são apresentados na Tabela 2. Para todas as culturas, os teores tanto adequado quanto tóxico foram maiores com extrator Mehlich 1 (que, no Brasil, é usado pela maioria dos laboratórios para análise de rotina do Mn). Portanto, os valores definidos pelo extrator Mehlich 1 são mais importantes do que os definidos pelo DTPA-TEA. Na literatura, os níveis adequados de Mn no solo medidos pelo extrator Mehlich 1 estão na faixa de 4 mg kg<sup>-1</sup> a 8 mg kg<sup>-1</sup> para a maioria das culturas anuais, enquanto os níveis críticos medidos pelo extrator DTPA-TEA estão na faixa de 2,5 mg kg<sup>-1</sup> a 5 mg kg<sup>-1</sup> para as culturas anuais (COX, 1987; MARTENS; WESTERMANN, 1991).

**Tabela 2.** Teores adequado e tóxico de Mn para culturas anuais em solo de Cerrado.

| Cultura               | Teor adequado (mg kg <sup>-1</sup> ) |                         | Teor tóxico (mg kg <sup>-1</sup> ) |                         |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|
|                       | Mehlich 1                            | DTPA-TEA <sup>(1)</sup> | Mehlich 1                          | DTPA-TEA <sup>(1)</sup> |
| Feijão                | 8                                    | 6                       | 128                                | 88                      |
| Arroz de terras altas | 8                                    | 4                       | 168                                | 80                      |
| Milho                 | 8                                    | 4                       | 400                                | 336                     |
| Soja                  | 8                                    | 4                       | 92                                 | 56                      |
| Trigo                 | 8                                    | 3                       | 44                                 | 40                      |

<sup>(1)</sup> Extrator ácido dietilenotriaminopentacético + trietanolamina.

Fonte: adaptado de Fageria (2001a).

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NA PLANTA

Os teores adequado e tóxico na planta, que fornecem informação importante para o diagnóstico do seu estado nutricional (FAGERIA, 2009), mudam de acordo com a idade e a parte de planta analisada. Geralmente, esses valores diminuem com o aumento da idade da planta graças ao aumento na sua matéria seca. Segundo a experiência dos autores deste livro, a deficiência de micronutriente para as culturas anuais geralmente aparece na fase vegetativa ou em torno de 25 a 45 dias após a germinação, se a quantidade do dado nutriente é limitada no solo. A deficiência nessa fase está relacionada com a taxa de crescimento máxima da planta. Portanto, uma análise da planta nessa fase é fundamental para diagnóstico de deficiência ou suficiência. Além disso, esses valores são muito estáveis em diferentes regiões agroecológicas. Portanto, não variam muito em uma dada cultura e podem ser comparados facilmente.

Fageria (2001a) determinou os níveis adequados e tóxicos de Mn na parte aérea das principais culturas anuais em solo de Cerrado; os resultados são apresentados na Tabela 3. Existem diferenças muito grandes entre as culturas, tanto nos níveis adequados como nos tóxicos. Heinrichs et al. (2008) relataram que, para o Mn, a faixa considerada adequada para diagnose foliar no feijoeiro é muito ampla, variando de 30 mg kg<sup>-1</sup> a 300 mg kg<sup>-1</sup>, dependendo da idade da planta.

**Tabela 3.** Níveis adequado e tóxico de Mn na parte aérea de culturas anuais<sup>(1)</sup>.

| Cultura               | Nível adequado (mg kg <sup>-1</sup> ) | Nível tóxico (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Feijão                | 400                                   | 1.640                               |
| Arroz de terras altas | 520                                   | 24.560                              |
| Milho                 | 60                                    | 2.480                               |
| Soja                  | 67                                    | 720                                 |
| Trigo                 | 173                                   | 720                                 |

<sup>(1)</sup>As análises de arroz e trigo foram feitas na fase de maturação. As análises das outras culturas foram feitas 4 semanas após a semeadura. As partes aéreas de todas as culturas foram analisadas. Fonte: adaptado de Fageria (2001a).

## TEOR E ACUMULAÇÃO NA PLANTA DURANTE O CICLO DA CULTURA

O teor de nutriente durante o ciclo da cultura é usado como índice do estado nutricional da planta. Na Figura 2, são apresentados o teor e a acumulação de Mn na parte aérea do feijoeiro durante o ciclo da cultura. O teor diminuiu com o avanço da idade da planta graças ao efeito de diluição, e a acumulação aumentou graças ao aumento na massa da matéria seca da parte aérea (FAGERIA, 2009). A acumulação máxima de Mn, de aproximadamente 100 g ha<sup>-1</sup>, ocorreu em torno de 60 dias após a semeadura do feijoeiro. Nas últimas duas coletas, a diminuição na acumulação estava relacionada com a translocação para as vagens e os grãos.

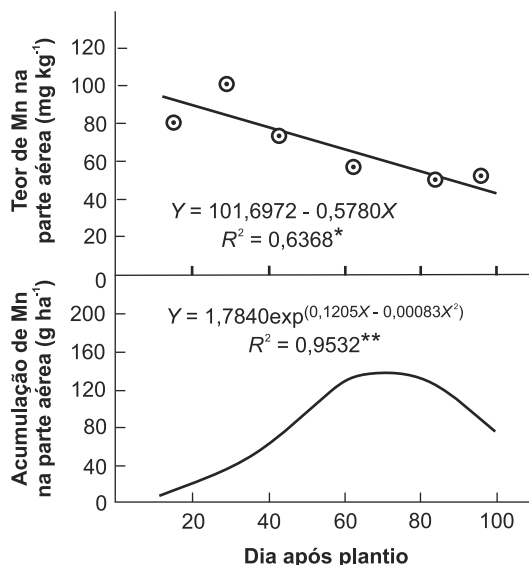


**Figura 2.** Teor e acumulação de Mn na parte aérea das plantas de feijoeiro durante o ciclo da cultura.

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade.

## EFICIÊNCIA DE USO

A eficiência de uso do Mn é baixa, como a de qualquer outro micronutriente. Existe diferença genotípica na absorção e utilização do Mn

(MARSCHNER, 1995). Genótipos eficientes absorvem mais Mn do solo e podem sobreviver e produzir mais do que genótipos não eficientes sob condições de baixo teor desse elemento no solo (HUANG; GRAHAM, 1997). A tolerância ao Mn é controlada geneticamente e é possível a criação de cultivares mais eficientes na absorção e utilização do Mn (BURK et al., 1990; GRAHAM et al., 1995; WISSEMEIR; HORST, 1991). As eficiências de uso do Mn na parte aérea e nos grãos durante o ciclo do feijoeiro são apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4.** Eficiência de uso do Mn (EUMn) na planta de feijoeiro.

| Idade de planta (dia)                                                                                     | Eficiência de uso de Mn <sup>(1)</sup><br>(kg de grãos g <sup>-1</sup> de Mn) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| 15                                                                                                        | 13,6                                                                          |
| 29                                                                                                        | 9,8                                                                           |
| 43                                                                                                        | 14,6                                                                          |
| 62                                                                                                        | 20,3                                                                          |
| 84                                                                                                        | 21,3                                                                          |
| 96 (colheita), na parte aérea                                                                             | 21,0                                                                          |
| 96 (colheita), nos grãos                                                                                  | 83,4                                                                          |
| <b>Análise de Regressão</b>                                                                               |                                                                               |
| Idade da planta (X) vs. EUMn (Y) = 8,9094 + 0,1599 X – 0,00023 X <sup>2</sup> , R <sup>2</sup> = 0,5102** |                                                                               |

<sup>(1)</sup> Massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos (em kg)/Acúmulo de Mn na parte aérea ou nos grãos (em g).

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

## INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

A disponibilidade do Mn é controlada por sua concentração no solo, pH, teor de matéria orgânica e potencial de oxirredução. Concentrações altas de Cu, Fe e Zn diminuem a absorção de Mn pelas plantas. A adição de fontes de nitrogênio (N) que acidifiquem o solo aumenta a disponibilidade de Mn graças à redução do pH do solo. A aplicação de K, na forma de KCl, também aumenta a disponibilidade de Mn para as plantas.

Com relação ao P, relação inversa é relatada quanto à absorção de Mn (TISDALE et al., 1985). Interações entre Mn e macro e micronutrientes no solo são apresentadas na Tabela 5. Houve aumento nos teores de P, enxofre (S) e boro (B) e diminuição nos teores de Cu, Fe e Zn.

**Tabela 5.** Interação entre manganês (Mn) e fósforo (P), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) no solo após o cultivo do feijoeiro.

| Mn                     | P    | S     | B    | Cu  | Fe   | Zn   |
|------------------------|------|-------|------|-----|------|------|
| (mg kg <sup>-1</sup> ) |      |       |      |     |      |      |
| 0                      | 38,6 | 8,34  | 0,12 | 1,4 | 81,5 | 0,68 |
| 20                     | 43,6 | 7,68  | 0,13 | 1,4 | 55,0 | 0,40 |
| 40                     | 42,3 | 10,20 | 0,14 | 1,3 | 63,5 | 0,40 |
| 60                     | 41,6 | 9,38  | 0,14 | 1,3 | 61,0 | 0,40 |
| 80                     | 45,5 | 10,68 | 0,13 | 1,3 | 50,0 | 0,40 |
| 100                    | 46,5 | 11,51 | 0,16 | 1,1 | 61,5 | 0,40 |

Fonte: adaptado de Heinrichs et al. (2001).

## RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO COM MANGANÊS

As recomendações de adubação com Mn devem ser feitas com base na análise do solo. Quando o teor de Mn no solo está abaixo do nível crítico, é esperada resposta da cultura à aplicação desse nutriente. O nível crítico de Mn no solo varia conforme o pH do solo. De acordo com Cox (1987), sob pH 6,0 e 7,0, os níveis críticos foram de 4,7 mg kg<sup>-1</sup> e 9,7 mg kg<sup>-1</sup> com o extrator Mehlich 1 (HCl 0,05 M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 M) e de 3,9 mg kg<sup>-1</sup> e 8,0 mg kg<sup>-1</sup> com o extrator Mehlich 3 (CH<sub>3</sub>COOH 0,2 M + NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 0,25 M + NH<sub>4</sub>F 0,015 M + HNO<sub>3</sub> 0,013 M + EDTA 0,001 M). Segundo Gettier et al. (1985), quando o teor de Mn no solo é maior do que 10 mg kg<sup>-1</sup>, extraído com Mehlich 1, a aplicação desse elemento não é recomendada para as culturas anuais.

A fonte mais comum para corrigir a deficiência de Mn é o MnSO<sub>4</sub>, cuja eficiência é comprovada tanto em solos ácidos como em alcalinos. As principais fontes de Mn são apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6.** Principais fontes de manganês (Mn).

| Fonte                                                             | Teor de Mn (%) |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| Cloreto de manganês ( $\text{MnCl}_2$ )                           | 17             |
| Carbonato de manganês ( $\text{MnCO}_3$ )                         | 31             |
| Óxido de manganês ( $\text{MnO}_2$ )                              | 63             |
| Sulfato de manganês ( $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) | 26–28          |
| Quelato de manganês (Mn-EDTA)                                     | 5–12           |
| Fritas de manganês                                                | 10–35          |

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2002).

A dose de Mn recomendada está em torno de  $10 \text{ kg ha}^{-1}$ , metade em aplicação a lanço e metade em aplicação no sulco (HATFIELD; HICKEY, 1981). Mascagni Junior e Cox (1985) relataram como nível ótimo para as culturas anuais a aplicação de  $14 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mn a lanço e  $3 \text{ kg ha}^{-1}$  no sulco, utilizando  $\text{MnSO}_4$ . A aplicação de  $1 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $2 \text{ kg ha}^{-1}$  do produto ( $\text{MnSO}_4$ ) via foliar é outra maneira de corrigir a deficiência desse nutriente.

Não existem muitos dados de pesquisa sobre uso de Mn via foliar que quantifiquem as doses e respostas da cultura do feijoeiro. Porém, Fernandes et al. (2007) avaliaram os efeitos de dose e época de aplicação de Mn, por via foliar, na produtividade e qualidade fisiológica de sementes do feijoeiro em solo de Cerrado. As doses de Mn utilizadas foram 0,  $150 \text{ g ha}^{-1}$ ,  $300 \text{ g ha}^{-1}$  e  $600 \text{ g ha}^{-1}$  com o produto comercial quelatizado (10% de Mn) em pulverização foliar com vazão de  $200 \text{ L ha}^{-1}$  de calda. Os tratamentos foram aplicados em três épocas:  $R_5$  (100% em pré-florescimento),  $R_6$  (100% em florescimento pleno) e metade em  $R_5$  e metade em  $R_6$ . Mesmo em solo com alto teor de Mn ( $10 \text{ mg kg}^{-1}$ , extrator DTPA-TEA), a aplicação via foliar do nutriente aumentou o número de vagens por planta, a massa de 100 sementes e a produtividade de grãos do feijoeiro. O número de vagens por planta e a produtividade de grãos aumentaram de maneira quadrática com o aumento das doses de Mn. As equações de regressão foram: doses de Mn versus número de vagens ( $Y = 14,85 + 0,00774 X - 0,000015 X^2$ ,  $R^2 = 0,96^{**1}$ ) e produtividade de grãos ( $Y = 3392,60 + 1,831 X - 0,0022 X^2$ ,  $R^2 = 0,99^{**}$ ). Com base nas

<sup>1</sup> Significativo a 1% de probabilidade.

equações de regressão, a dose adequada para números de vagens foi de 258 g ha<sup>-1</sup> e, para produtividade de grãos, de 298 g ha<sup>-1</sup>. Teixeira et al. (2004) também verificaram efeito positivo da aplicação de Mn foliar na produtividade do feijoeiro.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A deficiência de Mn na cultura do feijoeiro no Brasil não é muito comum. Porém, em alguns solos arenosos, sob pH alto (graças à aplicação de calcário) e sob alto teor de matéria orgânica (que forma complexos), pode ocorrer deficiência desse elemento. As valências mais comuns do manganês são Mn<sup>2+</sup>, Mn<sup>3+</sup> e Mn<sup>4+</sup>. Entre essas espécies, o Mn<sup>2+</sup> é o mais importante na absorção pelas plantas. Os principais fatores que influenciam a absorção de Mn pelas plantas são pH, teor de matéria orgânica, presença de O<sub>2</sub>, temperatura e potencial de oxirredução. O nível adequado de Mn pelo extrator Mehlich 1 é definido como 8 mg kg<sup>-1</sup> e, pelo extrator DTPA-TEA, 6 mg kg<sup>-1</sup>. O nível tóxico de Mn no solo é definido como 128 mg kg<sup>-1</sup> pelo extrator Mehlich 1 e 88 mg kg<sup>-1</sup> pelo extrator DTPA-TEA. O nível adequado de Mn na planta está em torno de 400 mg kg<sup>-1</sup> na fase inicial de crescimento (4 semanas após a semeadura). Informações disponíveis na literatura mostram que a absorção de Mn é reduzida com altas concentrações de Fe, Cu, Zn e P no solo, mas aumenta na presença de N e K. A deficiência de Mn pode ser corrigida com a aplicação de 10 kg ha<sup>-1</sup> a 15 kg ha<sup>-1</sup> de Mn, na forma de sulfato de manganês no solo. A aplicação de 1 kg ha<sup>-1</sup> a 2 kg ha<sup>-1</sup> do produto (MnSO<sub>4</sub>) via foliar é outra maneira de corrigir a deficiência desse nutriente.





## Capítulo 13

# Ferro

## INTRODUÇÃO

A deficiência de ferro (Fe) nas culturas, que é um problema mundial, é causada por fatores que interferem no processo de absorção e utilização pelas plantas (CHEN; BARAK, 1982; FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2011; KORCAK, 1987; SNYDER; JONES, 1988; VOSE, 1982; WELCH et al., 1991). Embora não seja comum no feijão, a deficiência de Fe em arroz de terras altas é relatada frequentemente em vários estados brasileiros em solos de Cerrado sob pH maior do que 6,0 (FAGERIA, 2000; FAGERIA et al., 1994, 2011). Nesses solos, essa deficiência não está relacionada com o baixo teor de Fe, mas com sua baixa absorção graças à precipitação e diminuição da solubilidade.

De modo geral, os fatores que contribuem para a deficiência de Fe nas plantas incluem baixo teor do nutriente no solo, aplicação de altas doses de calcário e fosfato, alto teor de metais pesados – como zinco (Zn), cobre (Cu) e manganês (Mn) –, alta e baixa temperaturas do ar, altas doses de  $\text{NO}_3^-$ , alto teor de matéria orgânica, desequilíbrio de cátions e raízes infectadas com nematoides (BROWN, 1961; FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 1990, 1999; KORCAK, 1987; WALLACE; LUNT, 1960).

Segundo Chaney et al. (1972), a principal forma de absorção de Fe pelas plantas (com exceção das monocotiledôneas) é  $\text{Fe}^{2+}$ ; mas, em solos bem drenados, a forma  $\text{Fe}^{3+}$  é geralmente dominante. Contudo, esses autores observaram que o  $\text{Fe}^{3+}$  deve ser obrigatoriamente reduzido para  $\text{Fe}^{2+}$  antes de ser absorvido pelas raízes das plantas eficientes. Bienfait et al. (1983) verificaram que a redução do Fe por uma enzima ocorre no plasmalema das células do córtex ou da epiderme. Uma discussão detalhada dos mecanismos de absorção de Fe é feita por Marschner et al. (1986).

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O conteúdo de Fe é de cerca de 5,1% na litosfera e em torno de 3,8% no solo (LINDSAY, 1979). O Fe ocorre no solo em um grande número de minerais primários e secundários. Pelo intemperismo, esses minerais decompõem-se, e o Fe liberado é precipitado como óxidos e hidróxidos férricos. Solos tropicais são tipicamente ricos em óxidos, principalmente de Fe e alumínio (Al). Os óxidos de Fe mais comumente encontrados nos solos brasileiros são hematita, goethita, maghemita, magnetita e ilmenita (FERREIRA et al., 2003b). A cor marrom, vermelha ou amarela dos perfis de solos é resultado da presença de óxidos de Fe, exceto na parte mais

superficial, onde a cor pode ser mascarada pelo efeito da matéria orgânica (BIGHAM; CIOLKOSZ, 1993; CORNELL; SCHWERTMANN, 1996; FERNANDES et al., 2004).

A solubilidade do Fe nos solos é controlada pelo  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  em solos bem oxidados, pelo  $\text{Fe}_3(\text{OH})_8$  em solos moderadamente oxidados e pelo  $\text{FeCO}_3$  em solos altamente reduzidos (LINDSAY; SCHWAB, 1982). As espécies de  $\text{Fe}^{3+}$  hidrolisadas –  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$  – são as formas de Fe inorgânico mais abundantes na solução do solo, mas são mantidas em níveis muito baixos para suprir adequadamente as plantas.

A atividade do  $\text{Fe}^{3+}$  é altamente dependente do pH do solo, e sua solubilidade diminui 1.000 vezes a cada unidade de aumento do pH (LINDSAY; SCHWAB, 1982). A influência do pH no teor de Fe extraído pelo extrator Mehlich 1 em solo de várzea pode ser vista na Tabela 1. O teor de Fe no solo diminuiu linearmente com o aumento do pH na faixa de 4,9 a 7,0. Da mesma forma, o teor de Fe na parte aérea do feijoeiro diminuiu significativamente com o aumento do pH (Figura 1). A diminuição no teor de Fe foi quase linear quando o pH aumentou de 5,0 para 6,0 e depois estabilizou.

**Tabela 1.** Teor de ferro (Fe) (extraído pelo extrator Mehlich 1) em solo de várzea sob diferentes pH.

| pH do solo em água          | Teor de Fe (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 4,9                         | 297                               |
| 5,9                         | 231                               |
| 6,4                         | 187                               |
| 6,7                         | 158                               |
| 7,0                         | 148                               |
| <b>Análise de Regressão</b> |                                   |
| $\beta_{(1)}$               | 673,50                            |
| $\beta_{(2)}$               | -75,69                            |
| $R^{2(3)}$                  | 0,55**                            |

<sup>(1)</sup> Interseção.

<sup>(2)</sup> Coeficiente angular.

<sup>(3)</sup> Coeficiente de determinação.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: Fageria e Baligar (1999).

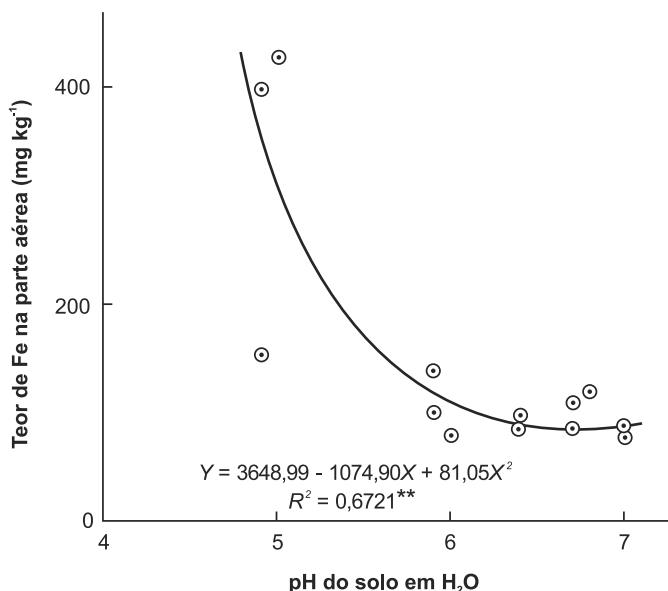
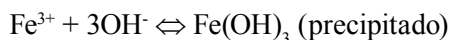


**Figura 1.** Relação entre pH do solo e teor de ferro (Fe) na parte aérea do feijoeiro.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2006a).

Nos solos bem drenados, o Fe é muito pouco solúvel em água e, mesmo nos solos ricos em Fe, as plantas podem sofrer deficiência desse nutriente. Nesses solos, a solubilidade do Fe diminui com o aumento do pH pela seguinte reação:



Quimicamente, o  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  é equivalente ao óxido hidratado  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . A calagem é uma prática essencial em solos ácidos, como os do Cerrado ou das várzeas do Brasil, para aumentar o pH e obter altas produtividades, principalmente das culturas de soja e feijão. Nesse caso, pode ocorrer a deficiência de micronutrientes, inclusive do Fe.

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

O Fe é imóvel na planta; portanto, sua deficiência – como clorose internerval e, mais tarde, como manchas necróticas (Figura 2) – aparece primeiro nas folhas mais novas. Com o tempo, toda a planta torna-se

amarelada, em tom de palha. Em caso de deficiências severas, a planta morre ou apenas cessa de crescer.

As nervuras das folhas são as últimas que perdem a clorofila quando aparece a deficiência de Fe na planta. Nas folhas verdes, aproximadamente 80% do Fe está localizado nos cloroplastos (FAGERIA et al., 2006a). Portanto, a deficiência de Fe afeta o processo metabólico da planta. Também ocorre a perda de clorofila, que está relacionada com a redução de constituintes do tilacoide, o que faz diminuir também a quantidade dos pigmentos fotossintéticos (MONGE et al., 1987; TERRY; ABADIA, 1986).

Existem publicações com fotografias coloridas para facilitar a identificação dos sintomas da deficiência de Fe nas plantas de feijoeiro (FAGERIA et al., 1996; ROSOLEM, 1996; WALLACE, 1961; WILCOX; FAGERIA, 1976).



Foto: Sebastião Araújo

**Figura 2.** Plântulas de feijoeiro com deficiência de ferro (Fe).

Fonte: Fageria et al. (1996).

## FUNÇÕES

O Fe é necessário para as plantas na síntese da clorofila. Embora o micronutriente participe desse processo, ele não faz parte da clorofila propriamente dita; entretanto, 75% do Fe da folha estão nos cloroplastos.

Portanto, quando há deficiência do Fe, diminuem-se o teor de clorofila e o número de cloroplastos e há menor quantidade de *grana* nos mesmos (MALAVOLTA, 1980). Além disso, o Fe é componente de várias enzimas que são catalisadoras de processos metabólicos das plantas. Entre as enzimas com Fe, as ferredoxinas têm importância especial graças a sua participação no processo fotossintético (FAGERIA et al., 2006a). Outra função do Fe é a síntese de proteínas, entre elas, a ribossômica (RNA): quando há carência de Fe, diminuem o teor de RNA e a síntese proteica. Além disso, Fageria (1992) mostrou que o Fe aumentou o desenvolvimento do sistema radicular do arroz em solução nutritiva.

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NO SOLO

Os teores adequado e tóxico de Fe no solo são dependentes do pH do solo e do extrator usado. Vários extratores têm sido comparados para estabelecer os níveis críticos de Fe no solo e na planta (FAGERIA et al., 1990). Norvell (1984), depois de comparar cinco extratores (DTPA<sup>1</sup>, EDTA<sup>2</sup>, HEDTA<sup>3</sup>, NTA<sup>4</sup> e EGTA<sup>5</sup>), concluiu que o DTPA e o HEDTA foram mais eficientes para a extração de Fe, Mn, Zn, Cu, Al, níquel (Ni) e cádmio (Cd). O extrator DTPA pode ser usado para solos ácidos, neutros ou alcalinos. O nível crítico de Fe no solo, pela extração com DTPA, situa-se na faixa de 2,5 mg kg<sup>-1</sup> a 5,0 mg kg<sup>-1</sup> (SIMS; JOHNSON, 1991).

No Brasil, Mehlich 1 é o extrator geralmente usado em análise de rotina pela maioria dos laboratórios. Com esse método, o nível crítico de Fe no solo é relatado na faixa de 4 mg kg<sup>-1</sup> a 8 mg kg<sup>-1</sup> para a maioria de culturas anuais (FAGERIA, 1992). Nos solos brasileiros, tanto de Cerrado como de várzea, existe Fe em quantidade suficiente, não havendo, portanto, necessidade de aplicação de Fe para a cultura do feijoeiro. Não existem dados na literatura sobre níveis críticos tóxicos de Fe no solo para a cultura do feijoeiro. Observa-se, na Tabela 2, o teor de Fe em solo de Cerrado após três cultivos de feijoeiro em razão de doses de Fe aplicado como sulfato ferroso. Quando foi usado o extrator Mehlich 1, não houve correlação entre doses e teor de Fe no solo. Contudo, quando se utilizou o extrator DTPA, a correlação foi positiva e significativa. Apesar disso, não houve resposta do feijoeiro à aplicação de Fe.

**Tabela 2.** Teor de ferro (Fe) em solo de Cerrado obtido com os extratores Mehlich 1 e DTPA após três cultivos de feijoeiro em plantio direto. O Fe foi aplicado a lanço antes do primeiro cultivo.

| Dose de Fe<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Fe (Mehlich 1)         | Fe (DTPA <sup>(1)</sup> ) |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|
|                                      | (mg kg <sup>-1</sup> ) |                           |
| 0                                    | 51                     | 23                        |
| 50                                   | 54                     | 25                        |
| 100                                  | 53                     | 24                        |
| 150                                  | 52                     | 25                        |
| 200                                  | 53                     | 25                        |
| 400                                  | 55                     | 27                        |
| $R^{2(2)}$                           | 0,49 <sup>ns</sup>     | 0,82*                     |

<sup>(1)</sup> Ácido dietilenotriaminopentacético.

<sup>(2)</sup> Coeficiente de determinação.

<sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade.

\* Significativo a 1% de probabilidade.

## TEORES ADEQUADO E TÓXICO NA PLANTA

Os teores adequado e tóxico de Fe na planta dependem de idade e parte da planta analisada. Além disso, espécies de plantas ou cultivares da mesma espécie também influenciam o teor de Fe na planta. Na Tabela 3, são apresentados os dados de níveis críticos de Fe para várias culturas anuais. Marschner (1995) relatou que o nível crítico para deficiência nas culturas anuais está na faixa de 50 mg de Fe kg<sup>-1</sup> a 150 mg de Fe kg<sup>-1</sup> de matéria seca. Porém, Romheld e Marschner (1991) relataram que o nível crítico de Fe situa-se na faixa de 30 mg kg<sup>-1</sup> a 50 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca da parte aérea. Não existem dados de níveis tóxicos de Fe na planta do feijoeiro.



**Tabela 3.** Nível adequado de ferro (Fe) na parte aérea de várias culturas anuais.

| <b>Cultura</b> | <b>Estádio de crescimento / Parte analisada</b>                             | <b>Nível adequado de Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b> |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Feijão         | Início da floração / Folha trifoliolada superior bem desenvolvida           | 100–300                                          |
| Arroz          | Perfilhamento / Toda a parte superior                                       | 70–300                                           |
| Trigo          | Pré-espigamento / Toda a parte superior                                     | 25–100                                           |
| Cevada         | Espigamento / Toda a parte superior                                         | 25–100                                           |
| Milho          | De 30 a 45 dias após a emergência / Toda a parte superior                   | 50–300                                           |
| Sorgo          | Surgimento da plântula / Toda a parte superior                              | 160–250                                          |
| Soja           | Antes da iniciação de vagens / Folha trifoliolada superior bem desenvolvida | 51–350                                           |
| Amendoim       | Início da frutificação / Caule e folhas superiores                          | 100–250                                          |

Fonte: Fageria et al. (2011).

## TEOR E ACUMULAÇÃO NA PLANTA DURANTE O CICLO

A absorção de Fe é um processo ativo; é necessária atividade metabólica para transportar o Fe das raízes para a parte aérea. Os vários fatores que determinam a absorção de Fe pelas plantas são o pH do solo, o teor de matéria orgânica, o estado de oxidação-redução, a espécie ou as cultivares da mesma espécie e a concentração de Fe no solo. A absorção também é influenciada pela concentração de outros elementos, como Mn, Cu e Zn. Nos solos arejados, a disponibilidade de Fe é também governada pela formação de quelatos de Fe (que são derivados de matéria orgânica), microrganismos do solo e exsudatos das raízes. O teor e a acumulação de Fe durante o ciclo da cultura do feijoeiro estão ilustrados na Figura 3. O teor de Fe diminuiu de maneira quadrática com o aumento da idade da planta, enquanto a acumulação aumentou da mesma maneira até aos 70 dias de idade e depois diminuiu (o que está relacionado com a translocação do nutriente para as vagens ou os grãos).

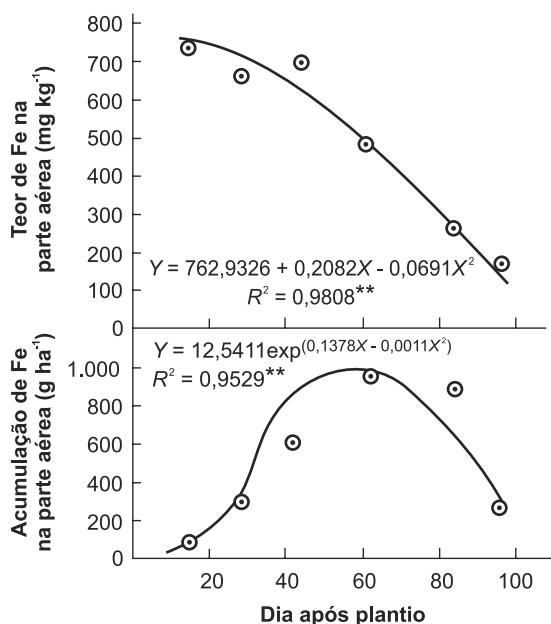


**Figura 3.** Teor e acumulação de Fe na parte aérea do feijoeiro durante o ciclo da planta.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

Marschner (1995) e Romheld e Marschner (1986), com base no sistema de aquisição do Fe expressado sob deficiência desse elemento, dividiram as plantas em dois grupos quanto à absorção de Fe: plantas com estratégia I (plantas dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramíneas) e plantas com estratégia II (plantas da família gramínea, incluindo arroz, cevada, aveia, trigo e gramíneas forrageiras) (ALAM et al., 2000). As plantas do primeiro grupo liberam íon H na rizosfera, o que solubiliza o Fe e aumenta sua disponibilidade para as plantas. Além disso, essas plantas reduzem o Fe<sup>3+</sup> para Fe<sup>2+</sup> na superfície das raízes, liberam compostos das raízes que reduzem o Fe e aumentam seus ácidos orgânicos, particularmente ácido cítrico, o que aumenta a disponibilidade de Fe. O segundo grupo caracteriza plantas que liberam ou produzem aminoácidos não proteinogênicos, chamados fitosideróforos, que são produzidos na rizosfera por microrganismos e fungos para aumentar a disponibilidade de Fe (NEILANDS; LEONG, 1986). De acordo com Romheld e Marschner (1986) e Marschner et al. (1986), os fitosideróforos são também sintetizados

na parte final da raiz e liberados na rizosfera para a solubilização do Fe. As funções desses fitosideróforos são solubilizar e transportar  $\text{Fe}^{3+}$  no processo de absorção pelas plantas (NEILANDS; LEONG, 1986). Os fitosideróforos têm grande afinidade com  $\text{Fe}^{3+}$ , principalmente sob alto pH (MARSCHNER, 1995). Observa-se, na Figura 4, o mecanismo de redução de  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$  no processo de absorção do Fe pelas plantas dicotiledôneas. Essas plantas produzem agentes, como o nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato hidreto (NADPH), que reduzem o  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$  na superfície da membrana das raízes. Dessa maneira, o  $\text{Fe}^{2+}$  é absorvido pela célula da raiz, e o quelato é liberado na solução do solo, podendo formar complexo com outro íon de Fe, de modo a continuar o processo de absorção.

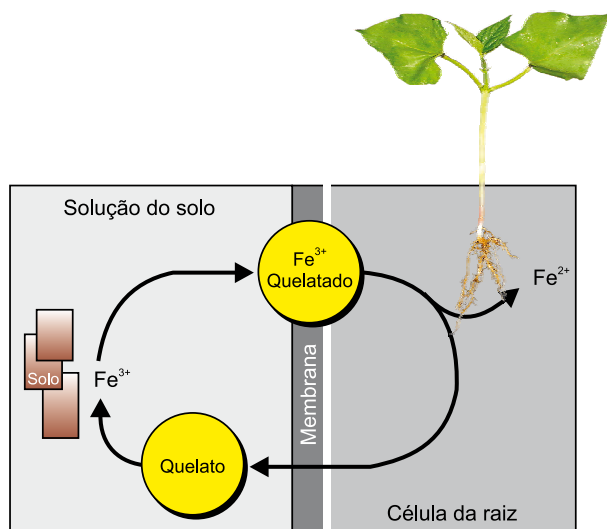


**Figura 4.** Mecanismo de redução de  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$  e absorção de ferro (Fe) pelas plantas dicotiledôneas.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

Ilustração: Sebastião Araújo

## EFICIÊNCIA DE USO DO FERRO

A eficiência de uso do Fe é baixa em solos bem drenados graças à sua precipitação com a formação de hidróxidos. Entretanto, em solos inundados, existe o problema de toxidez de Fe. Há diferença varietal

tanto para a deficiência como para a toxidez de Fe (FAGERIA, 2009). O mecanismo de eficiência sob baixo teor de Fe está relacionado com a liberação de fitosideróforos ou agentes quelatados para aumentar a taxa de absorção do nutriente. Também se observa que algumas variedades causam a redução do pH do solo, o que solubiliza o Fe e, consequentemente, aumenta a sua absorção.

A eficiência de uso do Fe pela cultura do feijoeiro durante o ciclo é apresentada na Tabela 4. A eficiência na parte aérea aumentou linearmente com a idade da planta, com uma variabilidade de 83%. A eficiência de uso foi maior nos grãos em comparação com a parte aérea. Existem diferenças entre espécies de plantas na absorção e utilização de Fe. Na Tabela 5, são assim classificadas as culturas anuais com relação à eficiência do uso de Fe: eficiente, moderadamente eficiente e não eficiente. O feijão é considerado eficiente.

**Tabela 4.** Eficiência de uso de ferro (Fe) (EUFé) na parte aérea e nos grãos do feijoeiro.

| Idade da planta<br>(dia)                                                        | EUFé<br>(kg g <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 15                                                                              | 1,4                                          |
| 29                                                                              | 1,4                                          |
| 43                                                                              | 1,6                                          |
| 62                                                                              | 5,4                                          |
| 84                                                                              | 4,6                                          |
| 96                                                                              | 6,6                                          |
| 96 (nos grãos)                                                                  | 13,5                                         |
| <b>Análise de Regressão</b>                                                     |                                              |
| Idade da planta (X) vs. EUFe (Y) = 0,1662 + 0,0668 X, R <sup>2</sup> = 0,8299** |                                              |

<sup>(1)</sup> Massa da matéria seca da parte aérea ou dos grãos/  
Acumulação de Fe na parte aérea ou nos grãos.

\*\* Significativo a 1% de probabilidade.

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

**Tabela 5.** Classificação das culturas quanto ao uso do ferro (Fe).

| <b>Eficiente</b> | <b>Moderadamente eficiente</b> | <b>Não eficiente</b>  |
|------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Feijão           | Cevada                         | Arroz de terras altas |
| Trigo            | Milho                          | Sorgo                 |
| Girassol         | Aveia                          | Soja                  |
| Amaranto         | Alfafa                         | Amendoim              |
|                  | Batata                         | Milheto               |

Fonte: Fageria (2009).

## INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

A absorção e a utilização do Fe são influenciadas pela concentração de outros nutrientes no meio de crescimento da planta. Essa interação, que pode ser negativa ou positiva, pode aumentar ou diminuir a absorção de Fe e de outros nutrientes e pode influenciar a produtividade das culturas. A interação entre Fe e fósforo (P) é bastante conhecida: o P precipita o Fe na rizosfera e diminui sua absorção pelas plantas. A formação de camada de Fe e P na superfície das raízes é relatada por Follett et al. (1981). Alguns pesquisadores também relataram que a interação de Fe e P pode ocorrer dentro da planta (TIFFIN, 1970). Hale et al. (1987) relataram que existe forte interação entre Fe e P no metabolismo das plantas e que alta concentração de Fe pode resultar em deficiência de P e vice-versa. Interações negativas entre Fe e Cu e Fe e Mn podem ocorrer dependendo da concentração de cada elemento no solo (FOLLETT et al., 1981).

## CORREÇÃO DA DEFICIÊNCIA

Geralmente, as análises de solo e plantas são usadas como guias para identificar e corrigir as deficiências nutricionais (BRADY; WEIL, 2002; FAGERIA et al. 2002). Como critério de avaliação da deficiência de Fe, essas análises devem ser usadas com cautela, porque outros fatores, além da quantidade extraível desse nutriente, afetam sua disponibilidade. Quando o pH é alto (> 6,0), frequentemente é observada deficiência de Fe graças à sua precipitação, o que faz com que a planta não possa absorvê-lo (OLIVEIRA et al., 1996; VOSE, 1982). Da mesma maneira, o Fe nas folhas das plantas fica inativo e, às vezes, as folhas com deficiência

apresentam maior teor desse elemento do que as normais (FAGERIA et al., 1994).

A aplicação de Fe via fontes inorgânicas não é efetiva para controlar sua deficiência, a não ser em doses muito altas. Doses variando de 200 kg de  $\text{FeSO}_4 \text{ ha}^{-1}$  a 560 kg de  $\text{FeSO}_4 \text{ ha}^{-1}$ , que são necessárias para corrigir a deficiência de Fe nas culturas anuais (KANNAN, 1984), geralmente são antieconômicas (MORTVEDT, 1991). As estratégias mais econômicas para corrigir a deficiência de Fe são aplicação foliar e uso de cultivares eficientes. A aplicação de solução de 1% a 2% de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  pode corrigir a deficiência na maioria das culturas.

A fonte inorgânica mais comum de Fe é o  $\text{FeSO}_4$ , mas existem outras fontes de Fe que podem ser usadas (Tabela 6). A aplicação de Fe no sulco é mais efetiva do que a aplicação a lanço (MORTVEDT, 1986, 1991). A correção da deficiência de Fe por meio de fontes inorgânicas e quelatos foi revisada por Hagstrom (1984).

**Tabela 6.** Principais fontes inorgânicas de ferro (Fe).

| Fonte                                                                                             | Teor de Fe (%) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )                                     | 20             |
| Sulfato férrico [ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ]                        | 23             |
| Sulfato de ferro e amônio [ $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] | 14             |
| Quelato de ferro (Fe-EDTA)                                                                        | 12             |
| Quelato de ferro (NaFe-HDTPA)                                                                     | 10             |
| Óxido ferroso (FeO)                                                                               | 77             |
| Óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )                                                         | 69             |
| Fosfato de ferro e amônio [ $\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ]        | 29             |
| Polifosfato de ferro e amônio [ $\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{HP}_2\text{O}_7$ ]                   | 22             |

Fonte: Fageria (1989, 2009), Mortvedt (1991) e Tisdale et al. (1985).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Fe é um nutriente essencial, que participa em vários processos metabólicos das plantas, como respiração, fotossíntese, síntese de DNA, fixação de  $\text{N}_2$  e formação de hormônios. A disponibilidade de Fe é

controlada por pH do solo, concentração de Fe no solo, teor de oxigênio (O) no solo, potencial de oxirredução, teor de matéria orgânica e concentrações de outros elementos, como Zn, Cu e Mn. Em solo bem drenado, a melhor prática para corrigir a deficiência de Fe na cultura do feijoeiro é a aplicação de sulfato ferroso via foliar na concentração de 1% a 2%, dependendo da idade da planta. O teor adequado de Fe na planta varia de 50 mg kg<sup>-1</sup> a 300 mg kg<sup>-1</sup>, conforme a idade da planta. O nível adequado no solo também depende de vários fatores, mas, em média, é de aproximadamente 5 mg kg<sup>-1</sup> de solo. O nível tóxico de Fe na planta em geral é maior do que 400 mg kg<sup>-1</sup> e, no solo, situa-se na faixa de 300 mg kg<sup>-1</sup> a 500 mg kg<sup>-1</sup>. Esses valores são referência e podem mudar com fatores como pH do solo, teor de matéria orgânica, cultivar plantada e fertilidade do solo.

## Capítulo 14

# **Molibdênio**



## INTRODUÇÃO

O molibdênio (Mo), nutriente essencial tanto para as plantas como para os animais, tem o maior peso atômico (95,94) entre todos os nutrientes essenciais para as plantas. Arnon e Stout (1939) estabeleceram a essencialidade do Mo para as plantas usando o tomate como planta-teste (FAGERIA et al., 2011; MARSCHNER, 1995). Em geral, solos derivados de granitos e de argilitos são mais ricos em Mo. O teor de Mo na litosfera, que é mínimo em comparação com o de outros micronutrientes, geralmente situa-se na faixa de  $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ , com valor médio de  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  (LINDSAY, 1979). Kabata-Pendias (2000) relatou que o teor de Mo em cinco classes de solos variou de  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $7,35 \text{ mg kg}^{-1}$ , com valor médio de  $1,52 \text{ mg kg}^{-1}$ . Singh (2008) mencionou que o valor médio de Mo em solos da Índia variou de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  em comparação com o valor de  $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $5 \text{ mg kg}^{-1}$  de Mo em âmbito mundial.

Existem poucos trabalhos de pesquisa sobre a necessidade de Mo pelas culturas em comparação com os outros micronutrientes como zinco (Zn), ferro (Fe), cobre (Cu), boro (B) e manganês (Mn) (FAGERIA, 2009). Porém, a deficiência de Mo é relatada, nos Estados Unidos, na cultura da soja (BURMESTER et al., 1988) e, no Brasil, na cultura do amendoim (QUAGGIO et al., 2004). A deficiência de Mo em culturas anuais também é relatada na Austrália por Anderson (1970) e Holloway et al. (2008). Singh (2008) constatou que, na Índia, com base na análise de solos e plantas, 11% dos solos são deficientes em Mo.

Brodrick et al. (1992), Kubota et al. (2008) e Sfredo et al. (1997) relataram que, por causa da baixa concentração do nutriente nos solos e de sua utilização sem a devida reposição, tem-se tornado comum a deficiência de Mo em cultivos agrícolas, principalmente em solos bastante intemperizados de regiões tropicais.

A deficiência de Mo é mais comum em solos arenosos, solos ácidos com altos teores de óxidos de Fe e alumínio (Al), podzolizados com baixo teor de Mo e em alguns solos calcários (MORTVEDT; CUNNINGHAM, 1971; RUBINS, 1956). Enquanto os solos ácidos são naturalmente deficientes em Mo, os alcalinos apresentam excesso desse elemento (FAGERIA, 2009). Clark (1984) mencionou que sementes produzidas em

solos deficientes em Mo são também responsáveis pelo aparecimento de deficiência de Mo em culturas anuais. Além disso, esse autor relatou que os distúrbios fisiológicos que ocorrem nas plantas cultivadas em solos ácidos são as toxicidades de Al e Mn e deficiências de cálcio (Ca), magnésio (Mg), Mo e fósforo (P). A acidificação dos solos é responsável pela deficiência de Mo em pastagens de leguminosas na Austrália (BRENNAN, 2002). A deficiência de Mo em culturas como mostarda, leguminosas como amendoim, trevo subterrâneo e soja, e em trigo e girassol tem sido relatada em várias partes do mundo (ALLOWAY, 2008). Sillanpaa (1990) analisou 190 amostras de solo de 15 países e relatou que 15% dos solos analisados apresentaram baixos teores de Mo, Zn, B, Cu, Mn e Fe. Alloway (2008) relatou as deficiências de micronutrientes no solo, com base nos teores relatados por Sillanpaa (1990), na seguinte ordem decrescente: Zn (49%), B (24%), Mo (15%), Cu (14%), Mn (10%) e Fe (3%). Os fatores de solo e plantas que estão relacionados com a deficiência de micronutrientes, inclusive do Mo, são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

**Tabela 1.** Solos ou propriedades comumente associados com deficiências de micronutrientes.

| Solo ou propriedade do solo                          | Micronutriente em deficiência        |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Textura arenosa e forte lixiviação                   | B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn        |
| Alto teor de matéria orgânica (> 10%)                | Cu, Mn, Zn                           |
| Alto pH do solo (> 7)                                | B, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn                |
| Alto teor de $\text{CaCO}_3$ (> 15%) (solo calcário) | B, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn <sup>(1)</sup> |
| Solo que recentemente recebeu calcário               | B, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn                |
| Alto teor de sais (solo afetado por sais)            | Cu, Zn, Fe, Mn                       |
| Solo ácido                                           | Mo, Cu, Zn                           |
| Gleissolo                                            | Zn                                   |
| Solo muito argiloso                                  | Cu, Mn, Zn                           |

<sup>(1)</sup> A deficiência de vários elementos pode ocorrer em solos arenosos e calcários.  
Fonte: adaptado de Fageria et al. (2002).

**Tabela 2.** Fatores da planta associados com deficiências de micronutrientes.

|                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Genótipo (cultivares eficientes e não eficientes)                                                                                                                                                                                                       |
| Suprimento de nitrogênio (efeitos na taxa de crescimento, diluição, elementos presos em proteínas na folhagem)                                                                                                                                          |
| Suprimento de fosfato [efeitos na taxa de crescimento – diluição (por exemplo, cobre) e metabolismo (por exemplo, zinco)]                                                                                                                               |
| Estresse de umidade (absorção reduzida em condições de seca)                                                                                                                                                                                            |
| Estresse de temperatura (alta e baixa temperaturas)                                                                                                                                                                                                     |
| Alta e baixa intensidade de luz                                                                                                                                                                                                                         |
| Condições radiculares (restrições na zona radicular reduzem o volume de solo explorado pelas raízes)                                                                                                                                                    |
| Infecção micorrizal (aumento do volume efetivo das raízes)                                                                                                                                                                                              |
| Secreção de exsudatos radiculares (por exemplo, fitosideróforos)                                                                                                                                                                                        |
| Doença patológica                                                                                                                                                                                                                                       |
| Uso de agroquímicos (por exemplo, glifosato, que induz deficiências de manganês, zinco etc.)                                                                                                                                                            |
| Efeitos antagônicos de outros micronutrientes (por exemplo, cobre-zinco, ferro-cobre, ferro-manganês e cobre-manganês)                                                                                                                                  |
| Cultura anterior (há alguma evidência de que produtos da mineralização de algumas espécies de plantas podem tornar certos micronutrientes menos disponíveis no solo. Um exemplo disso é a deficiência de cobre em trigo semeado em sequência à canola). |

Fonte: adaptado de Fageria et al. (2002).

## CICLO NO SISTEMA SOLO-PLANTA

O ciclo de nutrientes envolve a sua aplicação no solo, a transformação, a lixiviação, a imobilização (adsorção e precipitação) e a absorção pelas plantas. O conhecimento do ciclo dos nutrientes é muito importante para determinar os fatores que afetam a sua transformação na rizosfera, sua disponibilidade e, conseqüentemente, a eficiência do seu uso pela planta. A forma oxianônica de Mo ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) é a mais estável na solução do solo e é a absorvida pelas plantas (CLARK, 1984). O molibdato é adsorvido ou polimerizado sob condições ácidas, o que causa sua baixa disponibilidade em solos ácidos (MORTVEDT, 1994). A baixa mobilização (adsorção e precipitação) em solos ácidos se dá principalmente pelos

óxidos de Fe e Al, de maneira similar à que acontece com sulfatos e fosfatos (MENGEL et al., 2001; RAIJ, 1991). Em solos ácidos (com exceção dos solos arenosos), a precipitação do Mo aplicado na forma de  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  é rápida, e a lixiviação de Mo não ocorre (SMITH; LEEPER, 1969). Embora a mobilidade de Mo em solos ácidos seja baixa, ela é maior do que a do P (LAVY; BARBER, 1964). Observou-se que o Mo aplicado na forma de  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  foi lixiviado em solos turfosos e arenosos, mas não em solos ácidos lateríticos (JONES; BELLING, 1967).

O molibdato é transformado em  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$  com a adsorção de óxido de Fe em solos ácidos (GOLDBERG; FORSTER, 1998; LINDSAY, 1979). Alloway (2008) relatou que a disponibilidade dos micronutrientes absorvidos na forma de cátions, como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ , aumenta em solos ácidos, mas a dos absorvidos na forma aniônica, como  $\text{MoO}_4^{2-}$  e  $\text{HMoO}_4^+$ , diminui. Portanto, os solos ácidos altamente intemperizados são geralmente deficientes em Mo (JONES, 1985). A transformação na solução do solo é controlada pelo pH (ADAMS et al., 1990; GOLDBERG; FORSTER, 1998). Com o seu aumento, a adsorção de Mo diminui, aumenta sua solubilidade e, conseqüentemente, aumenta sua disponibilidade para as plantas (BARBER, 1995). Barber (1995) relatou que a solubilidade do Mo aumenta 10 vezes com o aumento de uma unidade de pH do solo graças à dessorção do molibdato. Foi relatada interação significativa e positiva entre calagem e disponibilidade de Mo (MORTVEDT; CUNNINGHAM, 1971). Portanto, a prática de calagem resolve o problema de deficiência de Mo em solos ácidos (HODGES et al., 1994; MORTVEDT, 1994; QUAGGIO et al., 1998; ROSOLEM; CAIRES, 1998). Adicionalmente, seu efeito positivo no cultivo de leguminosas tem sido associado ao melhor fornecimento de Ca e Mg, à maior disponibilidade de Mo para o complexo nitrogenase e a outros processos na planta não relacionados com a fixação biológica de nitrogênio (N) (QUAGGIO et al., 2004).

## FUNÇÕES DO MOLIBDÊNIO

O Mo é indispensável para a fixação biológica de  $\text{N}_2$  pelas plantas leguminosas (FERREIRA et al., 2003a; ROSOLEM, 1996; SILVA et al. 2006; SIQUEIRA; MOREIRA, 2002), pois tem importante função no sistema enzimático de fixação de  $\text{N}_2$ , o que sugere que plantas dependentes de simbiose, quando sujeitas à deficiência do Mo, ficam também carentes de N (MARSCHNER, 1995; OLIVEIRA et al., 1996). Vieira et al. (1998a,

2005a) demonstraram que os rizóbios nativos do solo podem ter sua eficiência simbiótica aumentada quando o feijoeiro é fertilizado com Mo em período definido do seu ciclo vegetativo. O nutriente, que é essencial para a atividade fotossintética nas plantas, participa em reações de redução ou mudança na valência (CLARK, 1984). A necessidade de Mo para as leguminosas é maior do que para os cereais por causa de sua importância na nodulação e fixação de  $N_2$  (FAGERIA, 2009). O Mo é componente essencial para duas enzimas: a nitrogenase e a redutase de nitrato (CLARK, 1984; CLARKSON; HANSON, 1980). A função do Mo no metabolismo de N na planta é reduzir  $NO_3^-$  para  $NO_2^-$ . Silva et al. (2006) relataram que o uso de Mo via foliar proporciona o menor tempo para a máxima hidratação de grãos. Há relevantes trabalhos sobre a cultura do feijoeiro em que é confrontado o uso de adubações com N e Mo, visando-se obter informações quanto ao ganho de produtividade (ANDRADE, 1998; ANDRADE et al., 2001; BASSAN et al., 2003).

## SINTOMAS DE DEFICIÊNCIA

A deficiência de Mo é igual à de N porque o Mo participa da fixação biológica de  $N_2$ . A deficiência de Mo é observada nas folhas mais velhas das plantas (CLARK, 1984; FAGERIA, 2009), ao contrário da deficiência da maioria dos micronutrientes. Os sintomas são amarelecimento das folhas mais velhas inicialmente, e, depois, todas as folhas ficam amarelas. As plantas com deficiência de Mo apresentam teor alto de  $NO_3^-$  pois esse micronutriente participa da redução do nitrato na planta (MORTVEDT; CUNNINGHAM, 1971).

## TEOR E ACUMULAÇÃO NAS PLANTAS

As plantas necessitam de menos Mo do que de qualquer outro micronutriente (MORTVEDT, 1994). Enquanto, para alguns autores (EPSTEIN; BLOOM, 2005), o teor de Mo nas plantas situa-se entre  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  e  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  de matéria seca, para outros (CLARK, 1984), o valor é menor do que  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ . O nível crítico de deficiência está na faixa de  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de matéria seca da planta. Níveis adequados de Mo nos tecidos das principais culturas, inclusive do feijão, são apresentados na Tabela 3.

As plantas podem absorver Mo em excesso sem causar toxicidade (MENGEL et al., 2001). Romheld e Marschner (1991) relataram que plantas

**Tabela 3.** Teor adequado de Mo nos tecidos das principais culturas.

| Cultura  | Parte da planta analisada                                                          | Teor adequado (mg kg <sup>-1</sup> ) |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Feijão   | Toda parte aérea (idade: 8 semanas)                                                | 0,4–0,8                              |
| Alfafa   | Toda parte aérea (antes da floração)                                               | 1–5                                  |
| Cevada   | Toda parte aérea (na floração)                                                     | 0,3–0,5                              |
| Milho    | Folha-bandeira (antes do espigamento)                                              | 0,1–2,0                              |
| Trigo    | Lâmina foliar (antes do espigamento)                                               | 0,05–0,1                             |
| Arroz    | Folhas superiores maduras (no perfilhamento)                                       | 0,5–2,0                              |
| Soja     | Trifólio superior completamente desenvolvido (antes do estabelecimento das vagens) | 1–5                                  |
| Amendoim | Colmos e folhas superiores (na formação das vagens)                                | 1–5                                  |

Fonte: adaptado de Fageria (2009).

podem absorver Mo na faixa de 200 mg kg<sup>-1</sup> a 1.000 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca sem efeito adverso no crescimento. Fageria (2009) mencionou que a toxicidade de Mo não ocorre até 500 mg kg<sup>-1</sup> de matéria seca da parte aérea.

## INTERAÇÃO COM OUTROS NUTRIENTES

A interação de Mo com outros macro e micronutrientes é fator importante na identificação e correção da deficiência desse elemento. O conhecimento dessa interação é importante para o fornecimento do nutriente em quantidade adequada e para aumentar a produtividade das culturas. A interação pode ser positiva, negativa ou neutra, dependendo dos nutrientes envolvidos. Para se obter a produtividade máxima, é necessário que todos os nutrientes essenciais estejam em nível adequado no solo.

Há relação antagônica entre Mo, Cu e sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). A redução na absorção de Mo foi relatada com o aumento de teor de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo (CLARK, 1984; REISENAUER, 1963). Registram-se, na literatura, algumas explicações para este fato: para Stout et al. (1951), a redução na absorção de Mo pelo SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dá-se pela competição por dois ânions de mesmo tamanho. Reisenauer (1963) sugere que o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> inibe a utilização de

$\text{MoO}_4^{2-}$  dentro da planta. Para Gubler et al. (1982), a explicação é que a redução do pH pode liberar mais  $\text{SO}_4^{2-}$ , o qual pode competir com a absorção de  $\text{MoO}_4^{2-}$ . Sob baixo pH, pode ocorrer mais adsorção de  $\text{MoO}_4^{2-}$ , o que pode reduzir a absorção de Mo (MENGEL et al., 2001).

Foi observado efeito sinérgico entre P e Mo (GREENWOOD; HALLSWORTH, 1960; GUPTA; MUNRO, 1969), especialmente em solos ácidos (BARSHAD, 1951). Stout et al. (1951) relataram que alta concentração de P na solução nutritiva aumenta em 10 vezes a absorção de Mo e que o P aumenta a liberação do Mo das células das raízes para o sistema de translocação. Ainda, o P forma o complexo fosfomolibdato, que é mais rapidamente absorvido pelas plantas (BARSHAD, 1951). Portanto, a aplicação de P junto com o Mo é uma estratégia para aumentar a disponibilidade desse micronutriente para as plantas. É relatada interação significativa entre Mo e Fe (OLSEN, 1972; OLSEN; WATANABE, 1979), em que ocorre inibição do Fe pelo Mo, mas não o contrário (CLARK, 1984). O antagonismo entre Mo e Cu foi observado por Jackson (1967).

## ESTRATÉGIA DE MANEJO

O primeiro passo para o manejo adequado de nutrientes ou para a obtenção da máxima produtividade econômica é o diagnóstico de deficiência, que pode ser feito a partir de detecção visual de sintomas, análises de solo e plantas e ensaios em casa de vegetação e campo (FAGERIA, 2009; FAGERIA et al., 2011). No Brasil, a análise do solo é mais comumente adotada para fazer recomendações de calagem e adubação para as culturas anuais. Porém, a combinação de detecção visual de sintomas, análise do solo e análise de plantas deve ser usada para o manejo adequado do Mo e a obtenção de resultados mais apropriados para a máxima produtividade econômica do feijoeiro.

### Calagem em solos ácidos

Ao contrário da disponibilidade dos demais micronutrientes, que diminui com o aumento do pH, a de Mo aumenta com o aumento do pH em solos ácidos. Portanto, a calagem é a prática mais efetiva e econômica para corrigir a deficiência de Mo em solos ácidos. O nível adequado do pH depende do solo, das espécies de plantas e de cada genótipo da espécie. O pH adequado para a cultura do feijoeiro varia em torno de 6,4 a 6,8 (FAGERIA; BARBOSA FILHO, 2008; FAGERIA et al., 2008b).

no Cerrado e em torno de 6,0 em solos de várzea (FAGERIA; BALIGAR, 1999). Jones (1985) relatou que o pH ideal para produção do feijoeiro situa-se na faixa de 5,8 a 6,2.

### Uso de fontes, doses e métodos apropriados

A deficiência de Mo pode ser corrigida com a aplicação de fertilizantes molíbdicos. Para aumentar a eficiência de Mo e corrigir a sua deficiência, é importante o uso de fontes, doses e métodos adequados na produção das culturas. As principais fontes de Mo são apresentadas na Tabela 4. Santos et al. (1979) verificaram que a resposta da cultivar Ricobaio 1014 de feijoeiro ao Mo variou de acordo com cada um dos solos estudados; enquanto, em um solo, a produtividade de grãos declinou linearmente com as doses de Mo, em outro, houve aumento linear e, num terceiro, a resposta foi quadrática, com produtividade máxima de grãos estimada com a dose de 12,3 g de Mo ha<sup>-1</sup>. A aplicação de 100 g de Mo ha<sup>-1</sup> a 500 g de Mo ha<sup>-1</sup> pode corrigir a deficiência desse micronutriente no solo (MARTENS; WESTERMAN, 1991). O efeito residual de Mo aplicado via fertilizantes é bastante longo, sendo maior do que o de outros micronutrientes (MORTVEDT; CUNNINGHAM, 1971). Gupta e MacKay (1968) relataram que mais de 80% do Mo aplicado permaneceu em solos ácidos podzólicos 5 anos após a sua aplicação. Scoott (1963) relatou que nova aplicação de Mo só foi necessária 5 anos após a primeira aplicação em solos da Nova Zelândia. Da mesma maneira, Fageria (2009) relatou que a aplicação de Mo tem efeito residual longo, que pode durar 2 ou 3 anos, dependendo do solo e da intensidade de cultivo.

**Tabela 4.** Principais fontes de molibdênio (Mo).

| Nome comum do fertilizante                                                                  | Teor de Mo (%) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Molibdato de sódio ( $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )                  | 39             |
| Molibdato de amônio [ $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ] | 54             |
| Fritas de molibdênio (Fritas de vidro)                                                      | 2–3            |
| Sulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ )                                                    | 60             |
| Trióxido de molibdênio ( $\text{MoO}_3$ )                                                   | 66             |

Fonte: adaptado de Fageria (2009).



A deficiência de Mo pode ser corrigida via aplicação foliar desse elemento, que constitui uma alternativa econômica, pois não acarreta significativos aumentos no custo de produção, uma vez que pequenas quantidades de nutrientes são necessárias e que essas aplicações podem ser combinadas com o controle sanitário (OLIVEIRA et al., 1998). Considerando que o Mo, quando absorvido pelas folhas, pode ser transportado para outras partes da planta em curtos intervalos de tempo (BRODRICK; GILLER, 1991), observou-se que a aplicação foliar de 120 g de Mo ha<sup>-1</sup> aos 25 dias após a emergência aumentou em três vezes o teor do micronutriente nos grãos de feijão (PESSOA et al., 2000). Com o uso da adubação foliar, que vem sendo testada como forma de fornecer Mo ao feijoeiro, registraram-se estímulo à nodulação e aumento da atividade da nitrogenase e da nitrato redutase, com consequente aumento na acumulação de N e na produtividade de grãos (BERGER et al. 1996; KUBOTA et al., 2008; OLIVEIRA et al., 1998; PESSOA et al., 2001; VIEIRA et al., 1998a, 19998b). Vieira et al. (2005a, 2005b), ao estudarem a resposta do feijoeiro à aplicação foliar de Mo em um Oxissolo brasileiro, observaram que houve um aumento quadrático quando o nutriente foi aplicado como molibdato de amônio na faixa de 0 a 200 g de Mo ha<sup>-1</sup>. A equação foi:  $Y = 1699,8823 + 4,6713 X - 0,0163 X^2$ ,  $R^2 = 0,8702^{**}$ . Com base nessa equação, a produtividade máxima de grãos (2.000 kg ha<sup>-1</sup>) foi obtida com a aplicação de 143 g de Mo ha<sup>-1</sup> via foliar.

Além de aplicação no solo e via foliar, a deficiência pode ser corrigida com o uso de sementes com alto teor de Mo, que podem fornecer quantidade do nutriente suficiente para garantir um adequado crescimento às plantas, sem adição suplementar de Mo ao solo (JACOB NETO; ROSSETTO, 1998; KUBOTA et al., 2008). Plantas de feijoeiro oriundas de sementes com alto teor de Mo acumularam quantidade pouco diferente da originalmente contida na semente, o que sugere que muito pouco Mo foi absorvido do solo (BRODRICK et al., 1992). O plantio de sementes com elevado conteúdo de Mo em solos pobres da África preveniu o aparecimento de deficiência de Mo por até quatro cultivos consecutivos no mesmo local (BRODRICK et al., 1995).

Outro método de suprimento de Mo é via *pellet* nas sementes, que se torna possível já que as quantidades de Mo requeridas pelas culturas são relativamente pequenas (BERGER et al., 1995; SFREDO et al., 1997). Entretanto, o *pellet* pode dificultar as trocas gasosas da semente, de modo

<sup>1</sup> \*\*Significativo a 1% de probabilidade.

a prejudicar sua germinação (ALBINO; CAMPO, 2001). Além disso, a aplicação de produto à base de Mo com inoculante nas sementes pode reduzir a sobrevivência do rizóbio e a nodulação de plantas de feijoeiro (ALBINO; CAMPO, 2001).

## **Análise do solo**

Na análise do solo, que é um dos métodos mais importantes para a avaliação da sua fertilidade, a escolha do extrator de um determinado nutriente é fundamental. Na análise de Mo, o extrator oxalato de amônio ácido, recomendado por Grigg (1953), ainda é usado e é o mais eficiente (SIMS; JOHNSON, 1991). O nível crítico de Mo situa-se na faixa de  $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo para a maioria das culturas (FAGERIA, 2009). Sims e Johnson (1991) relataram nível crítico de Mo no solo na faixa de  $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$  a  $0,3 \text{ mg kg}^{-1}$  do solo.

## **Uso de genótipos eficientes**

O uso de genótipos eficientes, junto com dose, fontes e métodos mais adequados, é importante para aumentar a eficiência de uso do Mo e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas. Diferenças significativas no uso de Mo por genótipos de feijoeiro foram relatadas por Brodrick e Giller (1991). Clark (1984), na sua revisão sobre o uso de Mo por plantas, concluiu que existe diferença entre genótipos de leguminosas.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A deficiência de Mo é relatada em solos ácidos e arenosos em várias partes do mundo, inclusive no Brasil. O pH do solo é o fator mais importante na determinação da disponibilidade dos micronutrientes, inclusive do Mo. Em solos ácidos, a deficiência de Mo, amplamente relatada, está relacionada à sua adsorção nos óxidos de Fe e Al. Em solos arenosos, está relacionada ao seu baixo teor natural e ao baixo teor de matéria orgânica. Além disso, o Mo aplicado como fertilizante é facilmente lixiviado em solos arenosos. A deficiência de Mo em solos ácidos pode ser corrigida com a calagem em nível adequado ou com aplicação de fertilizantes molíbdicos. A dose de Mo recomendada situa-se na faixa de  $100 \text{ g ha}^{-1}$  a  $500 \text{ g ha}^{-1}$ , dependendo do solo, de sua fertilidade e do genótipo usado. A aplicação foliar na faixa de  $150 \text{ g de Mo ha}^{-1}$  a  $200 \text{ g de}$

Mo ha<sup>-1</sup> também é uma estratégia importante na correção da deficiência desse elemento. A aplicação de P em solos ácidos também aumenta a absorção de Mo pelas plantas. A escolha de genótipos eficientes é outra estratégia importante na correção de Mo em solos deficientes nesse elemento. Os melhores resultados são obtidos com a combinação das duas estratégias (uso de fertilizantes e de genótipos eficientes). A parte econômica e ambiental deve ser levada em consideração quando uma dada estratégia é aplicada. No futuro, a deficiência de Mo pode aumentar nos solos brasileiros graças à intensificação dos cultivos e às altas produtividades. Portanto, medidas preventivas devem ser adotadas para não agravar o problema de deficiência de micronutrientes, inclusive do Mo.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. Análise de solo para micronutrientes: tema de reuniões de laboratórios. **Boletim Informativo SBCS**, Campinas, v. 20, p. 128-130, 1995.
- ABREU, C. A. de; LOPES, A. S. Identificação de deficiência de micronutrientes em três solos de várzea de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 22, n. 11/12, p. 1215-1224, 1987.
- ABREU, C. A.; FERREIRA, M. E.; BORKERT, C. M. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: zinco e cobre. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq: Fapesp: Potafos, 2001. p. 125-141.
- ADAMS, F. Crop response to lime in the Southern United States. In: ADAMS, F. (Ed.). **Soil acidity and liming**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 211-261. (ASA. Monograph, 12).
- ADAMS, F. Nutritional imbalances and constraints to plant growth on acid soils. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, p. 81-87, 1981.
- ADAMS, J. F.; BURMESTER, C. H.; MITCHELL, C. C. Long term fertility treatments and molybdenum availability. **Fertilizer Research**, Hague, v. 21, p. 167-170, 1990.
- ADAMS, M. W. Basis of yield component compensation in crop plants with special reference to field bean *Phaseolus vulgaris* L. **Crop Science**, Madison, v. 7, n. 5, p. 505-510, 1967.
- ADRIANO, D. C. **Trace elements in terrestrial environments: biochemistry bioavailability, and risks of metals**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer-Verlag, 2001. 867 p.
- ALAM, S.; KAMEI, S.; KAWAI, S. Phytosiderophores release from manganese induced iron deficiency in barley. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 23, n. 8, p. 1193-1207, 2000.
- ALBINO, U. B.; CAMPO, R. J. Efeito de fontes e doses de molibdênio do teor de fósforo na semente, obtida via adubação foliar, no crescimento e na nodulação do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, p. 527-534, 2001.
- ALESSI, J.; POWER, J. F. Effects of banded and residual fertilizer phosphorus on dryland spring wheat yield in the Northern plains. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 4, p. 792-796, 1980.
- ALEXANDER, M. **Advances in microbial ecology**. New York: Plenum, 1977. v. 3, 225 p.

ALI, S. F.; RAWAT, L. S.; MEGHVANSI, M. K.; MAHNA, S. K. Selection of stress-tolerant rhizobial isolates of wild legumes growing in dry regions of Rajasthan, India. **Journal of Agricultural and Biological Science**, v. 4, p. 13-18, 2009.

ALLOWAY, B. J. Micronutrientes and crop production: an introduction. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008. p. 1-39.

ALVAREZ VENEGAS, V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. de. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; BARRPS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 594-644.

AMARGER, N.; MACHERET, V.; LAGUERRE, G. *Rhizobium gallicum* sp. Nov. and *Rhizobium giardini* sp. Nov. from *Phaseolus vulgaris* nodules. **International Journal of Systematic Bacteriology**, Washington, DC, v. 47, n. 4, p. 996-1006, 1997.

AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. p. 189-203. (Boletim técnico, 100).

ANDERSON, A. J. Trace elements for sheep pastures and fodder crops in Australia. **Journal of Australian Institute of Agriculture Science**, Victoria, v. 36, p. 15-29, 1970.

ANDRADE, M. J. B. de. Influência do nitrogênio, rizóbio e molibdênio sobre o crescimento, nodulação radicular e teores de nutrientes no feijoeiro. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 41, p. 317-326, 1998.

ANDRADE, M. J. B. de; ALVARENGA, P. E. de; SILVA, R. da; CARVALHO, J. G. de; JUNQUEIRA, A. D. de A. Resposta do feijoeiro às adubações nitrogenada e molíbdica e à inoculação com *Rhizobium tropici*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, p. 934-940, 2001.

ANDRADE, R. da. S.; MOREIRA, J. A. A.; STONE, L. F. CARVALHO, J. de A. Consumo relativo de água do feijoeiro no plantio direto em função da porcentagem de cobertura morta do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 35-38, 2002.

ANDRE, E. M.; CRUZ, M. C. P.; FERREIRA, M. E.; PALMA, L. A. S. Frações de zinco em solo arenosos e suas relações com disponibilidade para *Cynodon spp.* cv. Tifton-85. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, p. 451-459, 2003.

- ANTUNES, I. F.; SILVEIRA, E. P.; SILVA, H. T. da. BRS Expedito: nova cultivar de feijão de grãos pretos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 1, p. 135-136, 2007.
- AQUINO, B. F.; HANSON, R. G. Soil phosphorus supplying capacity evaluated by plants removal and available phosphorus extraction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 5, p. 1091-1096, 1984.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. G. Teor de clorofila na folha como indicador do nível de N em cereais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 715-722, 2001a.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 158-167, 2001b.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BORTOLINI, C. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 4, p. 519-528, 2002.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 371-375, Apr. 1939.
- AVNIMELECH, Y.; HAHER, M. Ammonium volatilization from soils: equilibrium considerations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 1080-1084, 1977.
- AWARD, A. S.; EDWARDS, D. G. Reversal of adverse effects of heavy ammonium sulphate application on growth and nutrient status of a kikuyu pasture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 48, p. 169-183, 1977.
- BALASUBRAMANIAN, V.; MORALES, A. C.; CRUZ, R. T.; THIYAGARAJAN, T. M.; NAGARAJAN, R.; BABU, M.; ABDULRACHMAN, S.; HAI, L. H. Adaptation of the chlorophyll meter (SPAD) technology for real-time N management in rice: a review. **International Rice Research Institute**, Los Baños, v. 25, n. 1, p. 4-8, 2000.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; ELRASHIDI, M. A. Toxicity and nutrient constraints on root growth. **Horticulture Science**, Alexandria, v. 33, p. 960-965, 1998.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7/8, p. 921-950, 2001.
- BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J.; SMEDLEY, M. D. Enzyme activities in hill land soils of the Appalachian region. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, p. 367-384, 1988.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley, 1995. 414 p.

BARBOSA FILHO, M. P.; COBUCCI, T.; FAGERIA, N. K.; MENDES, P. N. Época de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado monitorada com auxílio de sensor portátil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 7, p. 425-431, 2009.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; SILVA, O. F. **Correção de deficiência de micronutrientes em arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 21 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 93).

BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1317-1324, 2000.

BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. da. Aspectos agroeconômicos da calagem e da adubação nas culturas de arroz e feijão irrigados por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 11, p. 1657-1667, 1994.

BARROW, N. J. Testing a mechanistic model X: the effect of pH and electrolyte concentration on borate sorption by a soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 427-435, 1989.

BARSHAD, I. Factors affecting the molybdenum content of pasture plants: II. Effect of soluble phosphates, available nitrogen, and soluble sulfates. **Soil Science**, Baltimore, v. 71, p. 387-398, 1951.

BARTOS, J. M.; MULLINS, G. L.; WILLIAMS, J. C.; SIKORA, F. J.; COPELAND, J. P. Water-insoluble impurity effects on phosphorus availability in monoammonium phosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 972-976, 1992.

BASSAN, D. A. Z.; ARF, O.; BUZETTI, S.; CARVALHO, M. C. A.; SANTOS, N. C. B.; SÁ, M. E.; GUERREIRO NETO, G. Inoculação de sementes e aplicação de nitrogênio e molibdênio na cultura do feijão de inverno: produção e qualidade fisiológica de sementes. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 23, n. 1, p. 76-83, 2001.

BASSAN, L.; FARINELLI, R.; PENARIOL, F. G.; FORNASIERI FILHO, D. Sucessão de cultivo de feijão-arroz com doses de adubação nitrogenada após adubação verde, em semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 62, p. 417-428, 2003.

BATAGLIA, O. C.; RAIJ, B. van. Eficiência de extratores na determinação de boro em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 14, n. 1, p. 25-31, 1990.

- BEEBE, S.; GONZALEZ, A. V.; RENGIFO, J. Nutrient composition, protein quality and antinutritional factors of some varieties of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in Burundi. **Food Chemistry**, Barking, v. 47, n. 2, p. 159-167, 1993.
- BENNETT, W. F. Plant nutrient utilization and diagnostic plant symptoms. In: BENNETT, W. F. (Ed.). **Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants**. St. Paul: The American Phytopathological Society, 1993. p. 1-7.
- BENZIONI, A.; VAADIA, Y.; LIPS, S. H. Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate reduction products of the shoots. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 24, n. 2, p. 288-290, 1971.
- BERGER, K. C.; TRUOG, E. Boron deficiencies as revealed by plant and soil tests. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v. 32, p. 297-301, 1940.
- BERGER, P. G.; VIEIRA, C.; ARAÚJO, G. A. A. Efeitos de doses e épocas de aplicação do molibdênio sobre a cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, p. 473-480, 1996.
- BERGER, P. G.; VIEIRA, C.; ARAÚJO, G. A. A.; CASSINI, S. T. A. Peletização de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) com carbonato de cálcio, rizóbio e molibdênio. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 42, p. 562-574, 1995.
- BERNARDI, A. C. de C.; MACHADO, P. L. O. de A.; SILVA, C. A. **Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil**. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J. R. R. (Ed.). *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 61-77.
- BIENFAIT, H. F.; BINO, R. J.; BLICK, A. M.; DUIVENVOORDEN, J. F.; FONTAIN, J. M. Characterization of ferric reducing activity in roots of Fe-deficient *Phaseolus vulgaris*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 59, p. 196-202, 1983.
- BIGGAR, J. W.; FIREMAN, M. Boron adsorption and release by soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 24, p. 115-120, 1960.
- BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. **Soil color**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. 172 p. (Special publication, 31).
- BINGHAM, F. T. Boron. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982. part 2, p. 431-447. (Agronomy Monograph, 9).
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 9/10, p. 1791-1800. 1994.



BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, n. 1, p. 56-60, 1995.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S.; VIGIL, M. F. Chlorophyll meter reading in corn as affected by plant spacing. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 24, n. 17/18, p. 2507-2516, 1993.

BLAIR, G. J. Nitrogen sulfur interaction in rice. In: EFFICIENCY of nitrogen fertilizers for rice. Los Baños: International Rice Research Institute, 1987. p. 195-203.

BLAIR, G. J.; MAMARIL, C. P.; MOMUAT, G. **Sulfur nutrition of wetland rice**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1978. 29 p. (Research paper series, 21).

BLEVINS, D. G.; LUKASZEWSKI, K. M. Boron in plant structure and function. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 49, p. 481-500, 1998.

BLEVINS, R. L.; MURDOCK, W.; THOMAS, G. W. Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 322-326, 1978.

BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. E. Acid soils. In: SOIL chemistry. New York: Wiley Interscience, 1979. p. 195-216.

BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J.; WHITE, R. E. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMANN, R. P. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. p. 169-179.

BOLLAND, M. D. A.; GILKES, R. J. The chemistry and agronomic effectiveness of phosphate fertilizer. **Journal of Crop Production**, [Calhoun], v. 1, n. 2, p. 139-163, 1998.

BORKERT, C. M.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA-JUNIOR, A. O potássio na cultura da soja. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Fapesp: Potafos, 2005. p. 671-713.

BORKERT, C. M.; PAVAN, M. A.; BATAGLIA, O. C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: ferro e manganês. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAJJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq: Fapesp: Potafos, 2001. p. 151-185.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Disponibilidade de cobre e zinco em solos do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 647-658, 2009.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 13<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 960 p.

BREDEMEIER, C. **Predição da necessidade de nitrogênio em cobertura em trigo e aveia**. 1999. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BREEMEN, N. van; DRISCOLL, C. T.; MULDER, J. Acidic deposition and internal proton source in acidification of soils and water. **Nature**, London, v. 307, p. 599-604, 1984.

BRENNAN, R. F. Residual value of molybdenum trioxide for clover production on an acidic sandy podzol. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, [Victoria], v. 42, p. 565-570, 2002.

BRODRICK, S. J.; AMIJEE, F.; KIPE-NOLT, J. A.; GILLER, K. E. Seed analysis as a means of identifying micronutrient deficiencies of *Phaseolus vulgaris* L. in the tropics. **Tropical Agriculture**, Surrey, v. 72, p. 277-284, 1995.

BRODRICK, S. J.; GILLER, K. F. Genotype difference in molybdenum accumulation affects N<sub>2</sub>-fixation in tropical *Phaseolus Vulgaris* L. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 42, p. 1339-1343, 1991.

BRODRICK, S. J.; SAKALA, M. K.; GILLER, K. E. Molybdenum reserves of seed, and growth and N<sub>2</sub> fixation by *Phaseolus vulgaris* L. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 13, p. 39-44, 1992.

BROWN, J. C. Iron chlorosis in plants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 13, p. 329-369, 1961.

BROWN, P. H.; SHELP, B. J. Boron mobility in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, p. 85-101, 1997.

BRUNETTO, G.; GATIBONI, L. C.; SANTOS, D. R.; SAGGIN, A.; KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 565-571, jul./ago. 2005.

BULISANI, E. A. Feijão. In: RAIJ, B. van; SILVA, N. M.; BATAGALI, O. C.; QUAGGIO, J. A.; HIROCE, R.; CANTARELLI, H.; BELLINAZZI JUNIOR, R.; DECHEN, A. R.; TRANI, p. E. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1985. 19 p. (IAC. Boletim técnico, 100).

BURK, D. G.; WATKINS, K.; SCOTT, B. J. Manganese toxicity effects on visible symptoms, yield, manganese levels, and organic acid levels in tolerant and sensitive wheat cultivars. **Crop Science**, Madison, v. 30, p. 275-280, 1990.

BURMESTER, C. H.; ADAMS, J. F.; ODOM, J. W. Response of soybean to lime and molybdenum on Ultisols in northern Alabama. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 52, 1391-1394, 1988.

BUZETTI, S.; MURAOKA, T.; SÁ, M. E. de. Doses de boro na soja em diferentes condições de acidez do solo: produção de matéria seca e de grãos e nível crítico no solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 157-161, 1990.

CABALLERO, S. V.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; MATSUI, E.; VICTORIA, R. L. Utilização do fertilizante nitrogenado aplicado a uma cultura de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 9, p. 1031-1040, 1985.

CAIRES, E. F.; CORRÊA, J. C. L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 502-509, 2006.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; BARBUIO, F. G.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAKMAK, I.; ROMHELD, V. Boron deficiency induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 1/2, p. 71-83, 1997.

CAKMAK, I.; TORUN, B.; ERENOGLU, B.; OZTURK, L.; MARSCHNER, H.; KALAYCI, M.; EKIZ, H.; YILMAZ, A. Morphological and physiological differences in the response of cereals to zinc deficiency. **Euphytica**, Dordrecht, v. 100, p. 349-357, 1998.

CAMBERATO, J. J. Bioavailability of calcium, magnesium, and sulfur. In: SUMNER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 53-69.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. Soil and plant analysis for lime and fertilizer recommendations in Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, p. 1691-1706, 1998.

CARADUS, J. R. Genetic differences in the length of root hairs in white clover and their effect on phosphorus uptake. In: SCAFIE, A. (Ed.). **Plant nutrition**. Warwick: Commonwealth Agricultural Bureaux, 1982. p. 84-88.

CARDOSO, E. J. B. N.; NAVARRO, R. B.; NOGUEIRA, M. A. Absorção e translocação de manganês por plantas de soja micorrizadas, sob doses crescentes deste nutriente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 415-423, 2003.

- CARVALHO, A. M. de; FAGERIA, N. K.; OLIVEIRA, I. P.; KINJO, T. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 61-67, 1995.
- CARVALHO, A. M. de; SILVA, A. M. da; COSTA, E. F. da; COUTO, L. Influência da fertirrigação no rendimento de grãos e componentes de produção do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. carioca. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 503-511, 1992.
- CARVALHO, L. H.; SILVA, N. M.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; KONDO, J. I.; CHIAVEGATO, E. J. Aplicação de boro no algodoeiro em cobertura e em pulverização foliar. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p. 265-269, 1996.
- CARVALHO, M. A. C.; FURLANI JUNIOR, E.; ARF, O.; SÁ, M. E.; PAULINHO, H. B.; BUZETTI, S. Doses e época de aplicação de nitrogênio e teores foliares deste nutriente e de clorofila em feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 445-450, 2003.
- CARVALHO, M. C. S.; RAIJ, B. van. Calcium sulfate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, The Hague, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997.
- CARVALHO-PUPPATO, J. G.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 1213-1218, 2004.
- CASTELLANO, S. D.; DICK, R. P. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 114-121, 1990.
- CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. J.; KAMPE, N.; PINTO, L. F. S. Mineralogia e fontes de potássio em solos no Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 579-587, 2002.
- CAUDLE, N. **Managing soil acidity**. Raleigh: TropSoils, 1991. 28 p. (TropSoils. Groundworks, 1).
- CAVALLARO, N.; MCBRIDGE, M. B. Zinc and copper sorption and fixation by an acid soil clay: effect of selective dissolutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1050-1054, 1984.
- CHAGAS, J. M.; VIEIRA, C.; ARAÚJO, G. A. A.; GOMES, J. M. Efeito da adubação do N e K sobre a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no inverno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa,

MG. **Anais...** Viçosa, MG: SBCS: Ed. da Universidade Federal de Goiás, 1995. p. 1291-1293.

CHAN, K. Y.; DAVEY, B. G.; GEERING, H. R. Adsorption of magnesium and calcium by a soil with variable charge. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 301-304, 1979.

CHANEY, R. L.; BROWN, J. C.; TIFFIN, L. O. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 50, p. 208-213, 1972.

CHEN, Y; BARAK, P. Iron nutrition of plants in calcareous soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 35, p. 217-240, 1982.

CHENIAE, G. M.; MARTIN, I. F. Effects of hydroxylamine on photosystem. II. Factors affecting the decay of O<sub>2</sub> evolution. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 47, p. 568-575, 1971.

CHIEN, S. H.; HAMMOND, L. L. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rock as influenced by soil phosphorus-fixing capacity. **Plant and Soil**, The Hague, v. 120, n. 2, p. 159-164, Dec. 1989.

CHOPART, J. L.; VAUCLIN, M. Water balance estimation model: field test and sensitivity analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1377-1384, Sept./Oct. 1990.

CHRISTENSON, D. R. BRIMHALL, P. B.; HUBBLE, L; BRICKER, C. E. Yield of sugar beet, soybean, corn, field bean, and wheat as affected by lime application on alkaline soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p. 1145-1154, 2000.

CHUEIRE, L. M. O.; BANGEL, E. V.; MOSTASSO, F. L.; CAMPO, R. J.; PEDROSA, F. O.; HUNGRIA, M. Classificação taxonômica das estirpes de rizóbio recomendadas para as culturas da soja e do feijoeiro baseado no sequenciamento do gene 16S rRNA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 833-840, 2003.

CLARK, R. B. Physiological aspects of calcium, magnesium, and molybdenum deficiencies in plants. In: ADAMS, F. (Ed.). **Soil acidity and liming**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 99-170.

CLARK, R. B. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use, and efficiency. In: BALIGAR V. C.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 131-209.

CLARKSON, D. T.; HANSON, J. B. The mineral nutrition of higher plants. **Annual Review of plant Physiology**, Palo Alto, v. 31, p. 239-298, 1980.

COBLEY, L. S. **An introduction to the botany of tropical crops**. London: Longman, 1976. p. 71-110.

COCHRANE, T. T. Chemical properties of natural savanna and forest soils in central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 139-141, 1989.

COCHRANE, T. T. Understanding and managing acid soils of tropical South America. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RICE PRODUCTION ON ACID SOILS OF THE TROPICS*, 1989, Kandy. **Rice production on acid soils of the tropics: proceedings...** Kandy: Institute of Fundamental Studies, 1991. p. 113-122.

COCHRANE, T. T.; SALINAS, J. G.; SANCHEZ, P. A. An equation for liming acid mineral soils to compensate crop aluminium tolerance. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v. 57, p. 133-140, 1980.

COCHRANE, T. T.; SÁNCHEZ, L. G.; AZEVEDO, L. G. de; PORRAS, J. A.; GARVER, C. L. **Land in Tropical America**. Cali: Ciat; Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1985. 146 p.

COELHO, M. R.; SANTOS, H. G. dos; OLIVEIRA, R. P. de; MORAES, J. F. V. Solos. In: SANTOS, A. B. dos; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de A. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. 2. ed. rev. ampl. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. p. 161-208.

COELHO, M. R.; SANTOS, H. G. dos; SILVA, E. F. da; AGLIO, M. L. D. O recurso natural solo. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J. R. R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 1-11.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLOS DE GOIÁS. **Recomendações de corretivos e fertilizantes para Goiás**: 5ª aproximação. Goiânia: Ed. da Universidade Federal de Goiânia: Emgopa, 1988. 101 p. (Informativo técnico, 1).

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO (RS/SC). **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

COOPER, H. D.; CLARKSON, D. T. Cycling of amino nitrogen and other nutrients between shoots and roots in cereals: a possible mechanisms integrating shoot and root in the regulation of nutrient uptake. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 40, n. 7, p. 753-762, 1989.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. Weinheim: VCH, 1996. 573 p.

CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; C. A. C. CRUSCIOL; D. M. FERNANDES; M. G. M. PERES. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 4, p. 1583-1590, 2008.

COSTA, R. C. L. da, LOPES, N. F.; OLIVA, M. A.; BARROS, N. F. de. Efeito da água e do nitrogênio sobre a fotossíntese, respiração e resistência estomática em *Phaseolus vulgaris*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 23, n. 12, p. 1371-1379, 1988.

COUTO, K. R.; SANTOS, J. B. dos; RAMALHO, M. A. P.; SILVA, G. S. da. Identificação de marcadores microssatélites relacionados ao escurecimento de grãos em feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 11, p. 1268-1274, nov. 2010.

COX, F. R. Micronutrient soil tests: correlation and calibration. In: BROWN, J. R. (Ed.). **Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation**. Madison: Soil Science Society of America, 1987. p. 97-117.

COX, F. R.; KAMPRATH, E. J. Micronutrient soil tests. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 289-317.

COX, F. R.; URIBE, E. Management and dynamics of potassium in a humid tropical Ultisol under a rice-cowpea rotation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 655-660, 1992.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; SILVA, L. M. da; LEMOS, L. B. Fontes e doses de nitrogênio para o feijoeiro em sucessão a gramíneas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1545-1552, 2007.

DARUSMAN, L. R. S.; WHITNEY, D. A.; JANSSEN, K. A.; LONG, J. H. Soil properties after twenty years of fertilization with different nitrogenous sources. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1097-1100, 1991.

DAVID, M. B.; MITCHELL, M. J.; NAKAS, J. P. Organic and inorganic sulfur constituents of a forest soil and their relationship to microbial activity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 847-852, 1982.

DE DATTA, S. K. **Principles and practices of rice production**. New York: Wiley, 1981. 618 p.

DENARDIN, N. D. **Seleção de estirpes de *Rhizobium leguminosarum* bv. Phaseoli tolerantes a fatores de acidez e resistentes a antibióticos**. 1991. 89 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

DIEROLF, T. S.; ARYA, L. M.; YOST, R. S. Water and cation movement in an Indonesian Ultisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 572-579, 1997.

DIJKSHOORN, W.; WIJK, A. L. van. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter: a review of published data. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 26, p. 129-157, 1966.

DOERGE, T. A.; GARDNER, E. Reacidification of two lime amended soils in Western Oregon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 680-685, 1985.

DOLAN, M. S.; DOWDY, R. H.; VOORHEES, W. B.; JOHNSON, J. F.; BIDWELLSCHRALER, A. M. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 4, p. 639-642, July/Aug. 1992.

DONALD, C. M. In search of high yield. **Journal of Australian Institute of Agricultural Science**, East Melbourne, v. 28, p. 171-178, 1962.

DONALD, C. M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. **Advances in Agronomy**, New York, v. 28, p. 366-405, 1976.

DOWLING, D. N.; BROUGHTON, W. J. Competition for nodulation of legumes. **Annual Review of Microbiology**, Palo Alto, v. 40, p. 131-137, 1986.

DREVON, J. J.; HARTWIG, U. A. Phosphorus deficiency increases the argon induced decline of nodule nitrogenase activity in soybean and alfalfa. **Planta**, Berlin, v. 201, n. 4, p. 463-469, 1997.

DUGGER, W. M. Boron in plant metabolism. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.). **Encyclopedia of plant physiology**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. v. 15, p. 626-650.

DUNCAN, R. R. Genetic manipulation. In: WILKINSON, R. E. (Ed.). **Plant-environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 1-38.

DUNHAM, R. J.; NYE, P. H. The influence of water content on the uptake of ions by roots. III. Phosphate, potassium, calcium and magnesium uptake and concentration gradient in soils. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, v.13, p. 967-984, 1976.

DWYER, L. M.; ANDERSON, A. M.; MA, B. L. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 75, n. 1, p. 179-182, 1995.

EARDLY, B. D.; WANG, F. S.; WHITTAM, T. S.; SELANDER, R. K. Species limits in rhizobium populations that nodulate the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.).



**Applied and Environmental Microbiology**, Washington, DC, v. 61, n. 2, p. 507-512, 1995.

EASTERWOOD, G. W.; SARTAIN, J. B. Clover residue effectiveness in reducing orthophosphate sorption on ferric hydroxide coated soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1345-1350, 1990.

ECKERT, D. J. Soil test interpretation: basic cation saturation ratios and sufficiency levels. In: BROWN, J. R. (Ed.). **Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation**. Madison: American Society of Soil Science, 1987. p. 53-64.

EGHBALL, B.; SANDER, D. H.; SKOPP, J. Diffusion, adsorption, and predicted longevity of banded phosphorus fertilizer in three soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 1161-1165, 1990.

ELLIOTT, G. C.; LAUCHLI, A. Phosphorus efficiency and phosphate-iron interaction in maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, n. 3, p. 339-403, 1985.

ELRASHIDI, M. A.; O'CONNOR, G. A. Boron sorption and desorption in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 27-31, 1982.

ELSEEWI, A. A.; ELMALKY, A. E. Boron distribution in soils and waters of Egypt. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 297-300, 1979.

EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. **Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados**. Planaltina, DF, 1976. 150 p.

ENGELS, C.; MARSCHNER, H. Plant uptake and utilization of nitrogen. In: BACON, P. E. (Ed.). **Nitrogen fertilization in the environment**. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 41-81.

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

ERNANI, P. R.; BARBER, S. A. Comparison of P availability from monocalcium and diammonium phosphates using a mechanistic nutrient uptake model. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 22, n. 1, p. 15-20, Feb. 1990.

ERNANI, P. R.; BARBER, S. A. Predicted soil phosphorus uptake as affected by banding potassium chloride with phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 534-538, Mar./Apr. 1991.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. Washington, DC: Wiley Interscience, 1975.

ESWARAN, H.; REICH, P.; BEINROTH, F. Global distribution of soils with acidity. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., 1996, Belo Horizonte. **Proceedings...** Campinas: Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 159-164.

EUROPEAN ECONOMIC COMMUNITY. Council directive of 18 December, 1975. On the approximation of the laws of member States relating to fertilizers. **Journal of the European Community**, Bruxelas, v.19, p.21-44, 1976.

EVANS, L. J. Retention of boron by agricultural soils from Ontario. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 67, p. 33-42, 1987.

FAGERIA, N. K. Adequate and toxic levels of copper and manganese in upland rice, common bean, corn, soybean, and wheat grown on an Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 9/10, p. 1659-1676, 2001a.

FAGERIA, N. K. Adubação e calagem. In: SANTOS A. B. dos; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. de. (Ed.). **A cultura do arroz no Brasil**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006a. p. 425-450.

FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: Embrapa-CNPAF, 1984. 341 p.

FAGERIA, N. K. Avaliação do estado nutricional do arroz. In: BRESEGHELLO, F.; STONE, L. F. (Ed.). **Tecnologia para o arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1998a. p. 59-66.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho, e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, p. 1419-1424, 2001b.

FAGERIA, N. K. Liming and copper fertilization in dry bean production on an Oxisol in no-tillage system. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, p. 1219-1228, 2006b.

FAGERIA, N. K. **Maximizing crop yields**. New York: Marcel Dekker, 1992. 274 p.

FAGERIA, N. K. Micronutrients influence on root growth of upland rice, common bean, corn, wheat, and soybean. **Journal of Plant Nutrition**, Wiley, v. 25, n. 3, p. 613-622, 2002a.

FAGERIA, N. K. **Nitrogen management in crop production**. Boca Raton: CRC, 2014. 408 p.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, p. 57-62, 2000a.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 390-395, 2000b.

FAGERIA, N. K. Nutrient management for sustainable dry bean production in the tropics. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, n. 9/10, p. 1537-1575, 2002b.

FAGERIA, N. K. Optimum soil acidity indices for dry bean production on an Oxisol in no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 5/6, p. 845-857, 2008.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998b.

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, p. 416-424, 2001c.

FAGERIA, N. K. Soil fertility and plant nutrition research under controlled conditions: basic principles and methodology. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 28, p. 1975-1999, 2005.

FAGERIA, N. K. Soil fertility and plant nutrition research under field conditions: basic principles and methodology. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, p. 1-21, 2007.

FAGERIA, N. K. Soil quality vs. environmentally-based agricultural management practices. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, n. 13/14, p. 2301-2329, 2002c.

FAGERIA, N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília, DF: EMBRAPA-DPU, 1989a. 425 p. (Embrapa-CNPAP, Documentos, 18).

FAGERIA, N. K. **The use of nutrients in crop plants**. Boca Raton: CRC, 2009. 430 p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical Oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 99, p. 345-399, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 88, p. 97-185, 2005a.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean, and wheat at different soil pH on an Inceptisol. **Journal of Plant nutrition**, Wiley, v. 22, p. 1495-1507, 1999.

- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 1303-1319, 2001.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Nutrient availability. In: HILLEL, D. (Ed.). **Encyclopedia of soils in the environment**. San Diego: Elsevier, 2005b. p. 63-71.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Response of common bean, upland rice, corn, wheat, and soybean to soil fertility of an Oxisol. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, p. 1279-1289, 1997.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Response of lowland Rice and common bean grown in rotation to soil fertility level on a varzea soil. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, n. 1, p. 13-20, 1996.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. Micronutrients in crop production. **Advances in Agronomy**, New York, v. 77, p. 185-268, 2002.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; CLARK, R. B. **Physiology of crop production**. New York: Haworth, 2006a. 345 p.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; EDWARDS, D. G. Soil-plant nutrient relationships at low pH stress. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990a. p. 475-507.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Marcel Dekker, 1997a. 624 p.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton: CRC, 2011. 560 p.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI Y. C. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, n. 6, p. 1121-1157, 2008a.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. Enhancing phosphorus use efficiency in crop plants grown on Brazilian Oxisols. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006, Uberlândia. **Proceedings...** Uberlândia: [s.n.], 2006b. p. 79-80.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. Aluminum toxicity in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 11, p. 303-319, 1988.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. Iron nutrition of plants: an overview on the chemistry and physiology of its deficiency and toxicity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 4, p. 553-570, 1990b.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; ZOBEL, R. W. Yield, nutrient uptake, and soil chemical properties as influenced by liming and boron application in common bean in a no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 38, n. 11, p. 1637-1653, 2007.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. **Deficiências nutricionais na cultura de arroz**: identificação e correção. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. 36 p. (Embrapa-CNPAF. Documentos, 42).

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Effect of partially acidulated rock phosphate and soluble phosphate on rice and common bean production in an Oxisol in Brazil. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM FOR THE OPTIMIZATION OF PLANT NUTRITION, 8., 1992, Lisboa. **Abstracts...** Dordrecht: Kluwer, 1992.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Influence of pH on productivity, nutrient use efficiency by dry bean, and soil phosphorus availability in a no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 7, p. 1016-1025, Apr. 2008.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Phosphorus fixation in an Oxisol of Central Brazil. **Fertilizers and Agriculture**, Paris, v. 94, p. 33-37, 1987.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; COSTA, J. G. C. da. Potassium use efficiency in common bean genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 1937-1945, 2001.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; STONE, L. F. Nutrição de fósforo na produção de feijoeiro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e Fósforo, 2004. p. 435-455.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; ZIMMERMANN, F. J. P. Caracterização química e granulométrica de solos de várzea de alguns estados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 2, p. 267-274, fev. 1994b.

FAGERIA, N. K.; BRESEGHELLO, F. Nutritional diagnostic in upland rice production in some municipalities of state of Mato Grosso, Brazil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, n. 1, p. 15-28, 2004.

FAGERIA, N. K.; GHEYI, H. R. **Efficient crop production**. Campina Grande: Ed. da Universidade Federal da Paraíba, 1999. 541 p.

FAGERIA, N. K.; GUIMARÃES, C. M.; PORTES, T. de A. Deficiência de ferro em arroz de sequeiro. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 47, n. 416, p. 1-5, 1994c.

FAGERIA, N. K.; MELO, L. C. Agronomic evaluation of dry bean genotypes for potassium use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, v. 35, 2014.

DOI: 10.1080/01904167.2014.911889.

- FAGERIA, N. K.; MELO, L. C.; FERREIRA, E. P. de B.; KNUPP, A. M. Resposta de genótipos de feijão à aplicação de nitrogênio e rizóbio. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 30.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 14.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 12.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 9.; SIMPÓSIO SOBRE SELÊNIO NO BRASIL, 1., 2012, Maceió.
- A responsabilidade socioambiental da pesquisa agrícola:** anais... Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012b. 1 CD-ROM.
- FAGERIA, N. K.; MELO, L. C.; OLIVEIRA, J. P. Nitrogen use efficiency in dry bean genotypes. **Journal Plant Nutrition**, v. 36, p. 2179-2190, 2013.
- FAGERIA, N. K.; MELO, L. C.; PEREIRA, J. P. de; COELHO, A. M. Yield and yield components of dry bean genotypes as influenced by phosphorus fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 43, n. 21, p. 2752-2766, Nov. 2012c.
- FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 110, p. 251-330, 2011.
- FAGERIA, N. K.; OLIVEIRA, I. P. de; DUTRA, L. G. **Deficiências nutricionais na cultura do feijoeiro e suas correções**. Goiânia: Embrapa-CNPAP, 1996. 40 p. (Embrapa-CNPAP. Documento, 65).
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos. Adubação fosfatada para o feijoeiro em solo de várzea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, p. 24-127, 1998a.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos. Influência do pH na produtividade do feijoeiro no sistema plantio direto em solo de cerrado. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 8., 2005, Goiânia. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. v. 2, p. 1018-1021. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 182).
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos. Rice and common bean growth and nutrient concentration as influenced by aluminum on an acid lowland soil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 5, p. 903-912, 1998b.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos. Yield physiology of dry bean. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 31, n. 6, p. 983-1004, 2008.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; BALIGAR, V. C. Phosphorus soil test calibration for lowland rice on an Inceptisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 5, p. 737-742, 1997b.
- FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; LINS, I. D. G.; CAMARGO, S. L. Characterization of fertility and particle size of varzea soils of Mato Grosso and

Mato Grosso do Sul States of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 28, n. 1/2, p. 37-47, 1997c.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B. dos; MOREIRA, A. Yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties as influenced by liming and iron application in common bean in a no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, n. 14, p. 1740-1749, 2010.

FAGERIA, N. K.; SLATON, N. A.; BALIGAR, V. C. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, New York, v. 80, p. 63-152, 2003a.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 42 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 92).

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Micronutrient deficiency problems in South America. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**, New York: Springer, 2008. p. 245-286.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Physical, chemical, and biological changes in the rhizosphere and nutrient availability. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 29, p. 1327-1356, 2006.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 1, p. 73-78, 2004.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; MOREIRA, A. Liming and manganese influence on common bean yield, nutrient uptake, and changes in soil chemical properties of an Oxisol under no-tillage system. **Journal of Plant Nutrition**, Wiley, v. 31, p. 1723-1735, 2008b.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos. **Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003b. 250 p.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos. **Maximização da eficiência de produção das culturas**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 294 p.

FAGERIA, N. K.; WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; CARVALHO, J. R. P. Response of upland rice and common bean to liming on an Oxisol. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMANN, R. P. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991a. p. 519-525.

FAGERIA, N. K.; WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; SOUSA, C. M. R. de. Characterization of physical and chemical properties of varzea soils of Goiás State

of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 22, n. 15/16, p. 1631-1646, 1991b.

FAO. **Faostat**. 2002. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 10 jun. 2010.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. A. Field comparison of lime requirement indices for maize. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW PH, 2., 1990, Beckley. **Plant-soil interactions at low pH: proceedings...** Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. p. 465-473. (Developments in plant and soil sciences, 45).

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B.; PENARIOL, F. G.; EGÉA, M. M.; GASPAROTO, M. G. Adubação nitrogenada de cobertura no feijoeiro, em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 2, p. 307-312, 2006.

FAWCETT, J. A.; FREY, K. J. Associations among nitrogen harvest index and other traits within two avena species. **Proceedings of the Iowa Academy of Science**, Cheddar Falls, v. 90, n. 4, p. 150-153, 1983.

FEIJÃO: dados de conjuntura da produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) no Brasil: 1985-2011. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

FENN, L. B.; TAYLOR, R. M.; MATOCHA, J. E. Ammonia losses from surface applied nitrogen fertilizer as controlled by soluble calcium and magnesium: general theory. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 4, p. 777-781, 1981.

FERNANDES, D. S.; SORATTO, R. P.; KULCZYNSKI, S. M.; BISCARO, G. A.; REIS, C. J. dos. Produtividade e qualidade fisiológica de sementes de feijão em consequência da aplicação foliar de manganês. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 3, p. 419-426, 2007.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 245-257, 2004.

FERREIRA, A. C. B.; ARAÚJO, G. A. A.; CARDOSO, A. A.; FONTES, P. C. R.; VIEIRA, C. Características agrônômicas do feijoeiro em função do molibdênio contido na semente e da sua aplicação via foliar. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, p. 65-72, 2003a.

FERREIRA, B. A.; FABRIS, J. D.; SANTANA, D. P.; CURTI, N. Óxidos de ferro das frações areia e silte de um Nitossolo desenvolvido de basalto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 405-413, 2003b.



FERREIRA, G. B.; FONTES, R. L. F.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H. Influência de algumas características do solo nos teores de boro disponível. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 91-101, 2001.

FLEMING, G. A. Essential micronutrients: I. Boron and molybdenum. In: DAVIES, B. E. (Ed.). **Applied soil trace elements**. New York: John Wiley & Sons, 1980. p. 155-197.

FOHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorous efficiency of plants: I. External and internal P requirement and uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 110, p. 101-109, 1988.

FOLLETT, R. H.; MURPHY, L. S.; DONAHUE, R. L. **Fertilizers and soil amendments**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 557 p.

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 4, p. 1549-1561, 2008.

FOTH, H. D.; ELLIS, B. G. **Soil fertility**. New York: John Wiley, 1988. 212 p.

FOX, R. H.; HOFFMAN, L. D. The effect of N fertilizer source on grain yield, N uptake, soil pH, and lime requirement in no-till corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 73, p. 891-895, 1981.

FOX, R. H.; KERN, J. M.; PIEKIELEK, W. P. Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, p. 741-746, 1986.

FOX, R. L.; KANG, B. T. Influence of phosphorus fertilizer placement and fertilization rate of maize nutrition. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, p. 34-40, 1978.

FRAGA, T. I.; JUNIOR, S. A. G.; INDA, A. V.; ANGHINONI, I. Suprimento de potássio e mineralogia de solos de várzea sob cultivos sucessivos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 3, p. 497-506, 2009.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; CENTURION, J. F.; BARBOSA, G. F. Variabilidade espacial da produtividade do feijão em um Latossolo Vermelho distroférico sob preparo convencional e plantio direto. **Acta Scientia Agronomica**, Meringa, v. 27, p. 61-67, 2005.

FRENEY, J. R.; JACQ, V. A.; BALDENSPERGER, J. F. The significance of the biological sulfur cycle in rice production. In: DOMMERGUES, Y. R.; DIEM, H. G. (Ed.). **Microbiology of tropical soils and plant productivity**. The Hague: Martinus Nijhoss, 1982. p. 271-317.

FURLANI JÚNIOR, E.; NAKAGAWA, J.; BULHÕES, L. J.; MOREIRA, J. A. A.; GRASSI FILHO, H. Correlação entre leituras de clorofila e níveis de nitrogênio aplicados em feijoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 55, n. 1, p. 171-175, 1996.

GABLEMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant Soil**, v. 72, p. 335-350, 1983.

GALRÃO, E. Z. Efeito de micronutrientes e do cobalto na produção e composição química do arroz, milho e soja em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 111-116, 1984.

GANESHAMURTHY, A. N.; NIELSEN, N. E. Arylsulphatase and the biochemical mineralization of soil organic sulphur. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 22, p. 1163-1165, 1990.

GAUDIN, R.; DUPUY, J. Ammoniacal nutrition of transplanted rice fertilizer with large urea granules. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 1, p. 33-36, 1999.

GERLOFF, G. C. Plant efficiencies in the use of nitrogen, phosphorus, and potassium. In: WRIGHT, M. J. (Ed.). **Plant adaptation to mineral stress in problem soils**. Ithaca: Cornell University Agriculture Experimental Station, 1976. p. 161-173.

GETTIER, S. W.; MARTENS, D. C.; DONOHUE, S. J. Soybean yield response prediction from soil test and tissue manganese levels. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, p. 63-66, 1985.

GIBSON, A. H. Factors in the physical and biological environment affecting nodulation and nitrogen fixation by legumes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 35, n. 1, p. 139-152, 1971.

GIBSON, A. H. Recovery and compensation by nodulated legumes to environmental stress. In: NUTMAN, P. S. (Ed.). **Symbiotic nitrogen fixation in plants**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. p. 385-403.

GIBSON, A. H. The influence of the environment and managerial practices on the legume-*Rhizobium symbiosis*. In: HARDY R. W.; GIBSON, A. H. (Ed.). **A treatise on dinitrogen fixation**. New York: Wiley Interscience, 1977. p. 393-430.

GIBSON, A. H.; JORDAN, D. C. Ecophysiology of nitrogen fixing systems. In: LANGE, O. L.; NOBEL, P. S.; OSMOND, C. B.; ZIEGLER, H. (Ed.). **Physiological plant ecology**: III. Response to the chemical and biological environment. New York: Springer-Verlag, 1983. p. 301-390.

GIORDANO, P. M.; NOGGLE, J. C.; MORTVEDT, J. J. Zinc uptake by rice as affected by metabolic inhibitors and competing cations. **Plant and Soil**, The Hague, v. 41, p. 637-646, 1974.

GOEDERT, W. J. Região dos cerrados: potencial agrícola e política para seu desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 24, n. 1, p. 1-17, 1989.

GOEDERT, W. J.; COREY, R. B.; SYERS, J. K. Lime effects on potassium equilibrium in soils of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v. 120, p. 107-111, 1975.

GOLDBACH, H. E.; YU, Q.; WINGENDER, R.; SCHULZ, M.; WIMMER, M.; FINDEKLEE, P.; BALUSKA, R. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Wiley, v. 164, p. 173-181, 2001.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 1/2, p. 35-48, 1997.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S. Factors affecting molybdenum adsorption by soils and minerals. **Soil Science**, New York, v. 163, p. 109-114, 1998.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; HEICK, E. L. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals and soils inferred from ionic strength effects. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 704-708, 1993.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; HEICK, E. L. Influence of anion competition on boron adsorption by clays and soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 161, p. 99-103, 1996.

GOLDBERG, S.; GLAUBIG, R. A. Boron adsorption and silicon release by the clay minerals kaolinite, montmorillonite, and illite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1173-1176, 1986.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Disponibilidade de fósforo em solos cultivados com arroz irrigado por alagamento no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2745-2750, 2008.

GOOS, R. J.; SCHIMELFENIG, J. A.; BOCK, B. R.; JOHNSON, B. E. Response of spring wheat to nitrogen fertilizers of different nitrification rates. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 2, p. 287-293, 1999.

GOURLEY, C. J. P.; ALLAN, D. L.; RUSSELLE, M. P. Plant nutrient efficiency: a comparison of definitions and suggested improvement. **Plant and Soil**, The Hague, v. 158, n. 1, p. 29-37, Jan. 1994.

GRAHAM, M. J.; NICKELL, C. D.; HOEFT, R. G. Inheritance of tolerance to manganese deficiency in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 35, p. 1007-1010, 1995.

GRAHAM, P. H.; DRAEGER, K.; FERREY, M. L.; CONROY, M. J.; HAMMER, B. E.; MARTINEZ, E.; NAARONS, S. R.; QUINTO, C. Acid pH tolerance in strains of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium*, and initial studies on the basis for acid tolerance of *Rhizobium tropici* UMR1899. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 40, n. 3, p. 198-207, 1994.

- GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P. B.; LAUCHLI, A. (Ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. v. 1, p. 57-102.
- GRAHAM, R. D.; ASCHER, J. S.; HAYNES, S. C. Selecting zinc efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. **Plant and Soil**, The Hague, v. 146, p. 241-250, 1992.
- GRAHAM, R. D.; RENGEL, Z. Genotypic variation in zinc uptake and utilization by plants. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 107-118.
- GRAHAM, R. D.; WELCH, R. M.; GRUNES, D. L.; CARY, E. E.; NORVELL, W. A. Effect of zinc deficiency on the accumulation of boron and other mineral nutrients in barley. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 652-657, 1987.
- GREENWOOD, E. A. N.; HALLSWORTH, E. G. Studies on the nutrition of forage legumes: II. Some interactions of calcium, phosphorus, copper, and molybdenum on the growth and chemical composition of *Trifolium subterraneum* L. **Plant Soil**, v. 12, p. 97-127, 1960.
- GRIGG, J. L. Determination of the availability of molybdenum of soils. **New Zealand Journal of Science and Technology**, Wellington, v. 34, p. 405-414, 1953.
- GRUNDON, N. J. **Hungry crops: a guide to nutrient deficiencies in field crops**. Brisbane: Department of Primary Industries, 1987. 246 p.
- GUBLER, W. D.; GROGAN, R. G.; OSTERLI, P. P. Yellows of melons caused by molybdenum deficiency in acid soils. **Plant Diseases**, v. 66, p. 449-451, 1982.
- GUPTA, U. C. **Boron and its role in crop production**. Boca Raton: CRC Press, 1993. 237 p.
- GUPTA, U. C. Boron deficiency and toxicity symptoms for several crops as related to tissue boron level. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 6, n. 5, p. 387-395, 1983.
- GUPTA, U. C. Boron nutrition of crop plants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 31, p. 73-307, 1979.
- GUPTA, U. C.; JAME, Y. W.; CAMPBELL, C. A.; LEYSHON.; NICHOLAICHUK, W. Boron toxicity and deficiency: A review. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 65, n. 3, p. 381-409, 1985.
- GUPTA, U. C.; MACKAY, D. C. Crop responses to applied molybdenum and copper on Podzol soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 48, p. 235-242, 1968.

GUPTA, U. C.; MUNRO, D. C. Influence of sulfur, molybdenum, and phosphorus on chemical composition and yields of brussels sprouts and of molybdenum on sulfur contents of several plant species grown in the greenhouse. **Soil Science**, Baltimore, v. 107, p. 114-118, 1969.

HABY, V. A.; RUSSELLE, M. P.; SKOGLEY, E. O. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium. In: WESTERMAN, R. L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3<sup>rd</sup> ed. Madison: American Society of Soil Science, 1990. p. 81-227.

HAGSTROM, G. R. Current management practices for correcting iron deficiency in plants with emphasis on soil management. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, p. 23-46, 1984.

HALDAR, M.; MANDAL, L. N. Effect of phosphorus and zinc on the growth and phosphorus, zinc, copper, iron and manganese nutrition of rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 59, p. 415-425, 1981.

HALE, M. G.; ORCUTT, D. M.; THOMPSON, L. K. **The physiology of plants under stress**. New York: John Wiley & Sons, 1987. 206 p.

HALLORAN, G. M. Cultivar differences in nitrogen translocation in wheat. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 32, n. 4, p. 535-544, 1981.

HAMDI, Y. A. Soil water tension and movement of rhizobia. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 3, n. 21, p. 121-126, 1971.

HAMMOND, L. L.; CHIEN, S. H.; MOKWUNYE, A. U. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. **Advances in Agronomy**, New York, v. 40, p. 89-140, 1986.

HARDY, R. W. F.; HOLSTEN, R. D.; JACKSON, E. K.; BURNS, R. C. The acetylene-ethylene assay for N<sub>2</sub> fixation: laboratory and field evaluation. **Plant Physiology**, Minneapolis, v. 43, n. 8, p. 1185-1207, 1968.

HARTER, R. D. Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 47-51, 1983.

HATFIELD, A. L.; HICKEY, J. M. **Crop fertilization based on North Carolina tests**. Raleigh: North Carolina Department of Agriculture, 1981. (Agronomic Division of North Carolina Department of Agriculture. Circular, 1).

HAVELKA, U. D.; HARDY, R. W. F. Legume N<sub>2</sub> fixation as a problem in carbon nutrition: In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NITROGEN FIXATION, 1., 1974, Pullmann. **Proceedings...** Pullman: Washington State University Press, 1976. p. 465-475.

HAVLIN, J. L.; WESTFALL, D. G. Potassium release kinetics and plant response in calcareous soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 366-370, 1985.

- HAYNES, R. J. Soil acidification induced by leguminous crops. **Grass Forage Science**, Washington, DC, v. 38, p. 1-11, 1983.
- HAYNES, R. J.; GOH, K. M. Ammonium and nitrate nutrition of plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, Cambridge, v. 53, n. 4, p. 465-510, 1978.
- HEINRICHS, R.; MOREIRA, A.; FIGUEIREDO, p. A. M.; MALAVOLTA, E. Atributos químicos do solo e produção do feijoeiro com a aplicação de calcário e manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 1157-1164, 2008.
- HELYAR, K. R. Nitrogen cycling and soil acidification. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, Sidney, v. 42, p. 217-221, 1976.
- HENSON, R. A. Measurements of N<sub>2</sub> fixation by common bean in Central Brazil as affected by different crops. **Plant and Soil**, The Hague, v. 152, n. 1, p. 53-58, 1993.
- HETRICK, J.A.; SCHWAB, A.P. Changes in aluminum and phosphorus solubilities in response to long term fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 755-761, 1992.
- HODGES, S. C.; GASCHO, G. S.; KIDDER, G. Calcium and magnesium. In: RESEARCH based on soil testing information and fertilizer recommendations for peanuts on Coastal Plain soils. Alabama: Auburn University, 1994. (Series Bulletin, 380).
- HOLLOWAY, R. E.; GRAHAM, R. D.; STACEY, S. P. Micronutrient deficiencies in Australian field crops. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008. p. 63-92.
- HOSFIELD, G. L. Genetic control of production and food quality factors in dry bean. **Food Technology**, Chicago, v. 45, n. 9, p. 98-103, 1991.
- HOU, J.; EVANS, L. J.; SPIERS, G. A. Boron fractions in soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 1841-1853, 1994.
- HU, H.; BROWN, P. H. Adsorption of boron by plant roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 172, p. 49-58, 1997.
- HUANG, C.; GRAHAM, R. D. Efficient Mn uptake in barley is a constitutive system. In: ANDO, T.; FUJITA, K.; MAE, T.; MATSUMOTO, H.; MORI, S.; SEKIYA, J. (Ed.). **Plant nutrition for sustainable food production and environment**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. p. 269-270.
- HUDNALL, W. H. Taxonomy of acid rice growing soils of the tropics. In: DETURCK, P.; PONNAMPERUMA, F. N. (Ed.). **Rice production on acid soils of the tropics**. Kandy: Institute of Fundamental Studies, 1991. p. 38.

- HUFFMAN, J. R. Effects of enhanced ammonium nitrogen availability for corn. **Journal of Agronomic Education**, Madison, v. 18, n. 2, p. 93-97, 1989.
- HUNGRIA, M.; ANDRADE, D. S.; CHUEIRE, L. M. O.; PROBANZA, A.; GUTIERREZ-MAÑERO, F. J.; MEGIAS, M. Isolation and characterization of new efficient and competitive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) rhizobia from Brazil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 11/12, p. 1515-1528, 2000.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Environmental factors affecting N<sub>2</sub> fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 65, n. 2/3, p. 151-164, 2000.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T.; ARAUJO, R. S. Fixação biológica do nitrogênio em feijoeiro. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1997. p. 187-294.
- HUSSAIN, F.; BRONSON, K. F.; SINGH, B.; PENG, S. Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, n. 5, p. 875-879, 2000.
- ISFAN, D. Genotypic variability for physiological efficiency index of nitrogen in oats. **Plant and Soil**, The Hague, v. 154, n. 1, p. 53-59, July 1993.
- ISHIZUKA, Y. **Nutrient deficiencies of crops**. Taipei: Aspac Food and Fertilizer Technology Center, 1978.
- ISRAEL, D. W.; JACKSON, W. A. The influence of nitrogen nutrition on ion uptake and translocation by leguminous plants. In: ANDREW, C. S.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils**. Melbourne: Csiro, 1978. p. 113-129.
- JACKSON, W. A. Physiological effects of soil acidity. In: PEARSON, R. W.; ADAMS, F. (Ed.). **Soil acidity and liming**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p. 43-124.
- JACOB NETO, J.; ROSSETTO, C. A. V. Concentração de nutrientes nas sementes: o papel do molibdênio. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 5, p. 171-183, 1998.
- JARVIS, S. C.; ROBSON, A. D. The effects of nitrogen nutrition of plants on the development of acidity in Western Australian soils. I. Effects with subterranean clover grown under leaching conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 34, p. 341-353, 1983.
- JAYACHANDRAN, K.; SCHWAB, A. P.; HETRICK, B. A. D. Micorrizal mediation of phosphorus availability: synthetic iron chelates effects on phosphorus solubilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1701-1706, 1989.

- JENSEN, E. S. Seasonal patterns of growth and nitrogen fixation in field-grown pea. **Plant and Soil**, The Hague, v. 101, n. 1, p. 29-37, 1987.
- JIN, J.; MARTENS, D. C.; ZELAZNY, L. W. Distribution and plant availability of soil boron fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1228-1231, 1987.
- JONES JUNIOR, J. B. Soil testing and plant analysis: guide to the fertilization of horticultural crops. **Horticulture Reviews**, [S.l.], v. 7, p. 61-67, 1985.
- JONES, G. B.; BELLING, G. B. The movement of copper, molybdenum, and selenium in soils as indicated by radioactive isotopes. **Australian Journal of Agriculture Research**, [Victória], v. 18, n. 5, p. 733-740, 1967.
- JORDAN, D. C. Rhizobiaceae Conn 1938. In: KRIEG, N. R.; HOLT, J. G. (Ed.). **Bergey's manual of systematic bacteriology**. Baltimore: Williams & Wilkins, 1984. p. 235-244.
- KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 3<sup>rd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. 432 p.
- KAMPRATH, E. J. Crop response to lime on soils in the tropics. In: ADAMS, A. (Ed.). **Soil acidity and liming**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 349-368.
- KAMPRATH, E. J. Residual effect of large application of phosphorus on high phosphorus fixing soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 59, p.25-27, 1967.
- KAMPRATH, E. J.; FOY, C. D. Lime-fertilizer-plant interactions in acid soils. In: OLSEN, R. W. (Ed.). **Fertilizer technology and use**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 105-151.
- KANEKO, F. H.; ARF, O.; GITTI, D. de C.; ARF, M. V.; FERREIRA, J. P.; BUZETTI, S. Mecanismos de abertura de sulcos, inoculação e adubação nitrogenada em feijoeiro em sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 125-133, 2010.
- KANNAN, S. Problems of iron deficiency in different crop plants in India: causative factors and control measures. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, p. 187-200, 1984.
- KASPAR, T. C.; ZAHLER, J. B.; TIMMONS, D. R. Soybean response to phosphorus and potassium fertilizers as affected by soil drying. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1448-1454, 1989.
- KELLY, J. D.; SCHNEIDER, K. A.; KOLKMAN, J. M. Breeding to improve yield. In: SINGH, S. P. (Ed.). **Common bean improvement in the twenty-first century**. Dordrecht: Kluwer, 1999. p. 185-222.



KEREN, R.; BINGHAM, F. T. Boron in water, soils, and plants. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 230-276, 1985a.

KEREN, R.; BINGHAM, F. T. Plant uptake of boron as affected by boron distribution between liquid and solid phases in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 297-302, 1985b.

KEREN, R.; BINGHAM, F. T.; RHOADES, J. D. Plant uptake of boron as affected by boron distribution between liquid and solid phases in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 297-302, 1985.

KHASAWNEH, F. E.; DOLL, E. C. The use of phosphate rock for direct application. **Advances in Agronomy**, New York, v. 30, p.159-206, 1978.

KHONJE, D. J.; VARSA, E. C.; KLUBEK, B. The acidulation effects of nitrogenous fertilizers on selected chemical and microbiological properties of soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 20, p. 1377-1395, 1989.

KINRAIDE, T. B. Identification of the rhizotoxic aluminum species. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, v. C.; MURRMANN, R. p. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. p. 717-728.

KLAMT, E.; KAMPE, N.; SCHNEIDER, P. **Solos de várzea no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 42 p. (Boletim técnico de solos, 4).

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H. Disposição do fertilizante na várzea. In: AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J. K.; STONE, L. F. (Ed.). **Produção do feijoeiro comum em várzeas tropicais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 191-206.

KLUTHCOUSKI, J.; AIDAR, H.; THUNG, M.; OLIVEIRA, F. R. de A. Manejo antecipado do nitrogênio nas principais culturas anuais. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 113, p. 1-24, mar. 2006. Encarte técnico.

KORCAK, R. F. Iron deficiency chlorosis. **Horticulture Review**, [Bern], v. 9, p. 133-186, 1987.

KUBOTA, F. Y.; ANDRADE NETO, A. C.; ARAÚJO, A. P.; TEIXEIRA, M. G. Crescimento e acumulação de nitrogênio de plantas de feijoeiro originadas de sementes com alto teor de molibdênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 4, p. 1635-1641, 2008.

LAING, D. R.; KRETCHMER, P. J.; ZULUAGA, S.; JONES, P. G. Field bean. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS, 1980, Los Baños. **[Papers]**... Los Baños: IRRI, 1983. p. 227-248.

- LAVRES JUNIOR, J.; MORAES, M. F.; CABRAL, C. P.; MALAVOLTA, E. Influência genotípica na absorção e na toxidez de manganês em soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 173-181, 2008.
- LAVY, T. L.; BARBER, S. A. Movement of molybdenum in the soil and its effect on availability to the plant. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 28, p. 93-97, 1964.
- LEHTO, T.; MALKONEN, E. Effects of liming and boron fertilization on boron uptake of *Picea abies*. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 163, p. 55-64, 1994.
- LEMOES, L. B.; FORNASIERI FILHO, D.; CAMARGO, M. B.; SILVA, T. R. B.; SORATTO, R. P. Inoculação de rizóbio e adubação nitrogenada em genótipos de feijoeiro. **Revista Agronomia**, Seropédica, v. 37, n. 1, p. 26-31, 2003.
- LENOBLE, M. E.; BLEVINS, D. G.; MILES, R. J. Prevention of aluminum toxicity with supplemental boron: II. Stimulation of root growth in an acidic, high-aluminum subsoil. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 19, p. 1143-1148, 1996.
- LIEBHARDT, W. The basic cation saturation ratio concept and lime and potassium recommendations on Delaware coastal plain soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 3, p. 544-549, 1981.
- LIEROP, W.; MARTEL, Y. A.; CESCAS, M. P. Onion response to lime on acid histosols as affected by Ca/Mg ratios. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, n. 6, p. 1172-1177, 1979.
- LIMA, D. M.; COLUGNATI, F. A. B.; PADOVANI, R. M.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; SALAY, E.; GALEAZZI, M. A. M. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. 2. ed. Campinas: Ed. da Unicamp, 2006. 113 p.
- LIMA, J. C. P. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; LIMA, J. G. C.; LIRA JUNIOR, M. A. Níveis críticos e tóxicos de boro em solos de Pernambuco determinados em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, p. 73-79, 2007.
- LIMING acid soils. Lexington: University of Kentucky, 1978. (University of Kentucky. Leaflet, AGR-19).
- LINDEMANN, W. C.; HAM, G. E. Soybean plant growth nodulation and nitrogen fixation as affected by root temperature. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, n. 6, p. 1134-1137, 1979.
- LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: Academic Press, 1979. 449 p.
- LINDSAY, W. L. Inorganic phase equilibrium of micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 41-57.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 421-428, 1978.

LINDSAY, W. L.; SCHWAB, A. P. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 5, p. 321-340, 1982.

LONERAGAN, J. F.; WEBB, M. J. Interactions between zinc and other nutrients affecting the growth of plants. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 119-134.

LOPES, A. S. Reserva de minerais potássico e produção de fertilizantes potássicos no Brasil. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na Agricultura Brasileira**, Piracicaba: Potafos, 2005. p. 21-32.

LOPES, A. S. **Solos sob "cerrado": características, propriedades e manejo**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983. 162 p.

LOPES, A. S.; ABREU, C. A. Micronutrientes na agricultura brasileira: evolução histórico e futura. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 265-298.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 4, p. 742-746, 1977.

LOPEZ BELLIDO, R. J.; LOPEZ BELLIDO, L.; LOPEZ BELLIDO, F. J.; CASTILLO, J. E. Faba bean (*Vicia faba* L.) response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed Mediterranean conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 5, p. 1253-1261, 2003.

LOVEADY, J. Influence of oxygen diffusion rate on nodulation of subterranean clover. **Australian Journal of Science**, Sydney, v. 26, p. 90-91, 1963.

LYNCH, J.; RODRIGUEZ, N. S. Photosynthetic nitrogen-use efficiency in relation to leaf longevity in common bean. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 5, p. 1284-1290, 1994.

LYNCH, J.; WHITE, J. W. Shoot nitrogen dynamics in tropical common bean. **Crop Science**, Madison, v. 32, n. 2, p. 392-397, 1992.

MACKAY, A. D.; BARBER, S. A. Soil moisture effect on potassium uptake by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, p. 524-527, 1985.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

- MALAVOLTA, E. Potassium status of tropical and sub-tropical region soils. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1985. p. 163-200.
- MALAVOLTA, E.; KLIEMANN, H. J. **Desordens nutricionais no cerrado**. Piracicaba: Potafos, 1985. 136 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C. OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1989. 201 p.
- MALHI, S. S.; NYBORG, M.; HARAPIAK, J. T.; FLORE, n. A. Acidification of soil in Alberta by nitrogen fertilizers applied to brome grass. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, v. C.; MURRMANN, R. p. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1991. p. 547-553.
- MANDAL, B.; ADHIKARI, T. K.; DE, D. K. Effect of lime and organic matter application on the availability of added boron in acidic alluvial soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 24, p. 1925-1935, 1993.
- MANDAL, B.; MANDAL, L. N. Effect of phosphorus application on transformation of zinc fraction in soil and on the zinc nutrition of lowland rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 121, p. 115-123, 1990.
- MANDAL, L. N.; HALDAR, M. Influence of phosphorus and zinc application on the availability of zinc, copper, iron, manganese and phosphorus in waterlogged rice soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 130, p. 251-257, 1980.
- MANN, E. N.; REZENDE, P. M. de; MANN, R. S.; CARVALHO, J. G. de; PINHO, E. V. R. von. Efeito da aplicação de manganês no rendimento e na qualidade de sementes de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 1757-1764, 2002.
- MARIANO, E. D.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; ANDRADE, A. T.; MARIANO, I. O. dos S. Níveis críticos de boro em solos de várzea para o cultivo do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 1637-1644, 2000.
- MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DUTT, G. R.; FULLER, W. H. Aluminum and silica solubility in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 12, p. 76-85, 1976.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2<sup>nd</sup> ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARSCHNER, H.; ROMHELD, V.; KISSEL, M. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 9, p. 695-713, 1986.

MARSH, B. H.; GROVE, J. H. Surface and subsurface soil acidity: soybean root response to sulfate-bearing spent lime. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1837-1842, 1992.

MARTENS, D. C.; LINDSAY, W. L. Testing soil for copper, iron, manganese and zinc. In: WESTERMAN, R. L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3<sup>rd</sup> ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 229-264.

MARTENS, D. C.; WESTERMANN, D. T. Fertilizer application for correcting micronutrient deficiencies. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 549-592.

MARTINEZ ROMERO, E. Diversity of *Rhizobium-Phaseolus vulgaris* symbiosis: overview and perspectives. **Plant and Soil**, The Hague, v. 252, n. 1, p. 11-23, 2003.

MARTINEZ ROMERO, E.; SEGOVIA, L.; MERCANTE, E. M.; FRANCO, A. A.; GRAHAM, P.; PARDO, M. A. *Rhizobium tropici*, a novel species nodulating *Phaseolus vulgaris* L. beans and *Leucaena* sp. trees. **International Journal of Systematic Bacteriology**, Washington, DC, v. 41, n. 3, p. 417-426, 1991.

MARZADORI, C.; ANTISARI, L. V.; CIAVATTA, C.; SEQUI, P. Soil organic matter influence on adsorption and desorption of boron. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 6, p.1582-1585, 1991.

MASCAGNI JUNIOR, H. J.; COX, F. R. Effective rates of fertilization for correcting manganese deficiency in soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 77, p. 363-366, 1985.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; GALLO, P. B.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; AMBROSANO, G. M. B.; CARMELLO, Q. A. C. Efeito da calagem sobre a produtividade de grãos, óleo e proteína em cultivares precoces de soja. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 53, p. 164-172, 1996.

MASTERSON, C. L.; SHERWOOD, M. T. Some effects of increased atmospheric carbon dioxide on white clover and pea. **Plant and Soil**, The Hague, v. 49, n. 2, p. 421-426, 1978.

MCBRIDE, M. B. **Reactions controlling heavy metal solubility in soils**. New York: Springer-Verlag, 1989. 56 p. (Advances in Soil Science, 10).

MCBRIDE, M. B.; BLASIAK, J. J. Zinc and copper solubility as a function of pH in an acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 866-870, 1979.

- MCCONNELL, S. G.; SANDER, D. H.; PETERSON, G. A. Effect of fertilizer phosphorus placement depth and winter wheat yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 148-153, 1986.
- MEEK, B.; GRAHAM, L.; DONOVAN, T. Long-term effects of manure on soil nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, organic matter, and water infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p.1014-1019, 1982.
- MEIRA, F. A.; SÁ, M. E. de; BUZETTI, S.; ARF, O. Dose e época de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 4, p. 383-388, abr. 2005.
- MELARATO, M.; PANOBIANCO, M.; VITTI, G. C.; VIEIRA, R. D. Manganês e potencial fisiológico de sementes de soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, p. 1069-1071, 2002.
- MELO, G. W.; MEURER, E. J.; PINTO, L. F. S. Fontes de potássio em solos distroféricos cauliniticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 597-603, 2004.
- MELO, L. C.; MELO, P. G. S.; FARIA, L. C. de; CABRERA DIAZ, J. L.; DEL PELOSO, M. J.; RAVA, C. A.; COSTA, J. G. C. da. Interação com ambientes e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum na região centro-sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 5, p. 715-723, 2007.
- MENDES, J. F. Características químicas e físicas de alguns solos sob cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CERRADOS, 2., 1967, Sete Lagoas. **Anais... Sete Lagoas: Ipeaco**, 1972. p. 51-63.
- MENGEL, D.; REHM, G. Fundamentals of fertilizer application. In: SUMNER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 2000. p. 155-173.
- MENGEL, K.; KIRKBY, A.; KOSEGARTEN, H.; APPEL, T. **Principles of plant nutrition**. 5<sup>th</sup> ed. Dordrecht: Kluwer, 2001. 849 p.
- MENON, R. G.; CHIEN, S. H.; GADALLA, A. N. Phosphate rocks compacted with superphosphates vs. partially acidulated rocks for bean and rice. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1480-1484, 1991.
- MERCANTE, F. M. **Uso de *Leucaena leucocephala* na obtenção de *Rhizobium* tolerante a temperaturas elevadas para inoculação do feijoeiro**. 1993. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- MERCANTE, F. M.; OTSUBO, A. A.; LAMAS, F. M. Inoculação de *Rhizobium tropici* e aplicação de adubo nitrogenado na cultura do feijoeiro. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DE SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27., 2006,

Bonito, MS. **A busca das raízes: anais...** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. 1 CD-ROM. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 82).

MERCANTE, F. M.; TEIXEIRA, M. G.; ABBOUD, A. C. S.; FRANCO, A. A. Avanços biotecnológicos na cultura do feijoeiro sob condições simbióticas. **Revista Universidade Rural: Série Ciência da Vida, Seropédica**, v. 21, n. 1/2, p. 127-146, 1999.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade dos sistemas agrícola. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo-ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 1-5.

MINCHIN, F. R.; SUMMERFIELD, R. J.; NEVES, M. C. A. Nitrogen nutrition of cowpeas (*Vigna unguiculata*): effects of timing on inorganic nitrogen applications on nodulation, plant growth and seed yield. **Tropical Agriculture**, Surrey, v. 58, n. 1, p. 1-12, 1981.

MIYASAKA, S.; FREIRE, E. S.; MASCARENHAS, H. A. A. Modo e época de aplicação de nitrogênio na cultura do feijoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 22, p. 511-519, 1963.

MOLL, R. H.; JACKSON, W. A.; MIKKELSEN, R. L. Recurrent selection for maize grain yield: dry matter and nitrogen accumulation and partitioning changes. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 4, p. 874-881, 1994.

MONGE, E.; VALE, E.; ABADIA, J. Photosynthetic pigment composition of higher plants grown under iron stress. **Progress in Photosynthesis Research**, [S.l.], v. 4, p. 201-204, 1987.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, n. 6, p. 1811-1822, 2010.

MORAES, J. F. L.; BELLINGIERT, P. A.; FORNASIERI, FILHO, D.; GALON, J. A. Efeito de doses de calcário e de gesso na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Carioca-80. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 438-447, 1998.

MORAES, J. F. V. Calagem e adubação. In: ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, J. A.; YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1988. p. 261-301.

MORAGHAN, J. T.; MASCAGNI, H. J. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. In: MORTVEDT, J. J.; COX, R. R.;

- SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrient in agriculture**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 371-425.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Ed. da Universidade Federal de Lavras, 2006. 729 p.
- MORROW, B. The rebirth of legumes. **Food Technology**, Chicago, v. 45, n. 9, p. 96-121, 1991.
- MORTVEDT, J. J. Correcting iron deficiencies in annual and perennial plants: present technologies and future prospects. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 130, p. 273-279, 1991.
- MORTVEDT, J. J. Crop response to level of water soluble zinc in granular zinc fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 33, p. 249-255, 1992.
- MORTVEDT, J. J. Grain sorghum response to banded acid type fertilizers in iron deficient soil. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 11, p. 1297-1310, 1986.
- MORTVEDT, J. J. Needs for controlled availability micronutrient fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 38, p. 213-221, 1994.
- MORTVEDT, J. J.; CUNNINGHAM, H. G. Production, marketing, and use of other secondary and micronutrient fertilizers. In: DINAUER, R. C. (Ed.). **Fertilizer technology and use**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: Soil Science Society of America, 1971. p. 413-454.
- MULLINS, G. L. Plant availability of P in commercial superphosphate fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, p. 1509-1525, 1988.
- MULLINS, G. L.; SIKORA, F. J. Field evolution of commercial monoammonium phosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1469-1472, 1990.
- MUNNS, D. N. Mineral nutrition and the legume symbiosis. In: HARDY, R. W.; GIBSON, A. H. (Ed.). **A treatise on dinitrogen fixation: agronomy and ecology**. New York: Wiley Interscience, 1977.
- MURATA, Y. Differences of photosynthetic rate among species. In: MIYACHI, S.; MURATA, Y. (Ed.). **Photosynthesis and dry matter production**. Tokyo: Riko-Sha, 1980. p. 437-475.
- NABLE, R. O.; BANUELOS, G. S.; PAULL, J. G. Boron toxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, p. 181-198, 1997.
- NAKAMURA, T.; OSAKI, M.; SHINANO, T.; TADANO, T. Different mechanisms of carbon-nitrogen interaction in cereal and legumes crops. In: ANDO, T.; FUJITA, K.;



MAE, T.; TSUMOTO, H.; MORI, S.; SEKIYA, J. (Ed.). **Plant nutrition for sustainable food production and environment**. Dordrecht: Kluwer, 1997. p. 913-914.

NASCIMENTO, C. W. A. **Dessorção, extração e fracionamento de zinco, cobre e manganês em solos**. 2001. 60 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F. Correlação entre características de latossolos e parâmetro de equações de adsorção de cobre e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 965-971, 2004.

NASCIMENTO, P. C. do; BAYER, C.; NETTO, L. F. S.; VIAN, A. C.; VIEIRO, F.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 1821-1827, 2009.

NEILANDS, J. B.; S. A. LEONG. Siderophores in relation to plant growth and disease. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 37, p. 187-208, 1986.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, p. 655-663, 2003.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 39, p. 475-483, 2006.

NORVELL, W. A. Comparison of chelating agents as extractants for metals in diverse soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1285-1292, 1984.

NOVAIS, R. F. de. Soja. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V., V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª. aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 323-324.

NYATSANGA, T.; PIERRE, W. H. Effect of nitrogen fixation by legumes on soil acidity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 936-940, 1973.

OATES, K. M.; CALDWELL, A. G. Use of by-product gypsum to alleviate soil acidity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 915-918, 1985.

OBATA, H. Physiological functions of micro essential elements. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.). **Science of the rice plant**. Tokyo: Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. p. 402-412.

OGHOGHORIE, C. G. O.; PATE, J. S. The nitrate stress syndrome of the nodulated field pea. In: LIE, T. A.; MULDER, E. G. (Ed.). **Biological nitrogen fixation in natural and agricultural habitats**. The Hague: Martins Nighoff, 1971.

- OHNO, T.; GRUNES, D. L. Potassium-magnesium interactions affecting nutrient uptake by wheat forage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 685-690, 1985.
- OKAZAKI, M.; TAKAMIDOH, K.; YAMANE, I. Adsorption of heavy metal cations on hydrated oxides and oxides of iron and aluminum with different crystallinities. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 32, p. 523-533, 1986.
- OLIVEIRA JUNIOR, J. A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Efeitos do manganês sobre a soja cultivado em solo de cerrado do triângulo mineiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, p. 1629-1636, 2000.
- OLIVEIRA NETO, W.; MUNIZ, A. S.; SILVA, M. A. G.; CASTRO, C.; BORKERT, C. M. Extração e mobilidade vertical de boro em Latossolo Vermelho Eutroférico no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 5, p. 1259-1267, 2009.
- OLIVEIRA, A. P. de; SILVA, V. R. F.; ARRUDA, F. P. de; NASCIMENTO, I. S. do; ALVES, A. U. Rendimentos de feijão caupi em função de doses e formas de aplicação de nitrogênio. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 1, p. 77-80, 2003.
- OLIVEIRA, I. P. de; ARAÚJO, R. S.; DUTRA, L. G. Nutrição mineral e fixação biológica de nitrogênio. In: ARAÚJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1996. p. 169-221.
- OLIVEIRA, I. P.; SANTOS, A. B. dos. Correção da acidez do solo. In: AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J. K.; STONE, L. F. (Ed.). **Produção do feijoeiro comum em várzeas tropicais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 157-168.
- OLIVEIRA, M. F. G.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; VASCONCELLOS, C. A.; ALVES, V. M. C. Relação entre o zinco disponível por diferentes extratores, e as frações de zinco em amostras de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 827-836, 1999.
- OLIVEIRA, W. S.; MEINHARDT, L. W. SESSITSCH, A.; TSAI, S. M. Analysis of *Phaseolus Rhizobium* interactions in a subsistence farming system. **Plant Soil**, [S.l.], v. 204, p. 107-115, 1998.
- OLSEN, S. R. Micronutrient interactions. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 243-264.
- OLSEN, S. R. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH,

E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1980. p. 361-410.

OLSEN, S. R.; BARBER, S. A. Effect of waste application on soil phosphorus and potassium. In: ELLIOTT, L. F.; STEVENSON, F. J. (Ed.). **Soils for management of organic wastes and waste water**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1977. p. 197-215.

OLSEN, S. R.; KEMPER, W. D.; SCHAIK, J. C. van. Self-diffusion coefficient of phosphorus in soil measured by transient and steady state methods. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 154-158, 1965.

OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. Interactions of added gypsum in alkaline soils with uptake of iron, molybdenum, and zinc by sorghum **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 125-130, 1979.

OSAKI, M.; SHINANO, T.; MATSUMOTO, M.; ZHENG, T.; TADANO, T. A root-shoot interaction hypothesis for high productivity of field crops. In: ANDO, T.; FUJITA, K.; MAE, T.; MATSUMOTO, H.; MORI, S.; SEKIYA, J. (Ed.). **Plant nutrition for sustainable food production and environment**. Dordrecht: Kluwer, 1997. p. 669-674.

PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; PAULETTO, E. A.; SOUSA, R. O. de; CASTILHOS, D. D.; ÁVILA, C. L. de; RECKZIEGEL, N. L. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 819-830, 2009.

PARKER, D. R.; DINRAIDE, T. B.; ZELAZNY, L. W. Aluminum speciation and phytotoxicity in dilute hydroxy-aluminum solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p.438-444, 1988.

PATEL, K. P.; SINGH, M. V. Copper research and agriculture production. In: TONDON, H. L. S. (Ed.). **Micronutrient research and agricultural production**. New Delhi: Fertilizer Development and Consultation Organization, 1995. p. 33-55.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 993-997, 1982.

PEARSON, R.W. **Soil acidity and liming in the humid tropics**. Ithaca: Cornell University: Cornell Institute of Agriculture, 1975. (Cornell Institute of Agriculture. Bulletin, 30).

PELEGRIN, R. de; MERCANTE, F. M.; OTSUBO, I. M. N.; OTSUBO, A. A. Resposta da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada e à inoculação com rizóbio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 219-226, 2009.

PENG, S.; GARCIA, F. V.; LAZA, R. C.; CASSMAN, K. G. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 5, p. 987-990, 1993.

PENNINGTON, J. A. T.; YOUNGT, B. Sodium, potassium, calcium, phosphorus and magnesium in foods from the United States total diet study. **Journal of Food Composition and Analysis**, San Diego, v. 3, n. 2, p. 145-165, 1990.

PEREIRA, A. R.; MACHADO, E. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas: IAC, 1987. 33 p. (IAC. Boletim Técnico, 114).

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; FARIA, L. C. de; DEL PELOSO, M. J.; COSTA, J. G. C. da; RAVA, C. A.; WENDLAND, A. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum com grãos tipo carioca na Região Central do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 1, p. 29-37, 2009.

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; FARIA, L. C. de; DEL PELOSO, M. J.; WENDLAND, A. Estratificação ambiental na avaliação de genótipos de feijoeiro-comum tipo carioca em Goiás e no Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 6, p. 554-562, 2010.

PESSOA, A. C. S.; RIBEIRO, A. C.; CHAGAS, J. M.; CASSINI, S. T. A. Atividades de nitrogenase e redutase de nitrato e produtividade do feijoeiro "Ouro Negro" em resposta à adubação foliar com molibdênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 217-224, 2001.

PESSOA, A. C. S.; RIBEIRO, A. C.; CHAGAS, J. M.; CASSINI, S. T. A. Concentração foliar de molibdênio e exportação de nutrientes pelo feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 75-84, 2000.

PETERSON, G. A.; SANDER, D. H.; GRABOUSKI, P. H.; HOOKER, M. L. A new look at low and broadcast phosphate recommendations for winter wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 73, p. 13-17, 1981.

PETERSON, T. A.; BLACKMERY, T. M.; FRANCIS, D. D.; SCHEPERS, J. S. **G93-1171 using a chlorophyll meter to improve N management**. Lincoln: University of Nebraska, 1993. 7 p. (Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. Paper, 1353).

PHILLIPS, D. A.; NEWELL, K. D.; HASSELL, S. A.; FELLING, C. E. The effect of CO<sub>2</sub> enrichment on root nodule development and symbiotic N<sub>2</sub> reduction in *Pisum sativum* L. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 63, n. 3, p. 356-362, 1976.

PIEKIELEK, W. P.; FOX, R. H. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 1, p. 59-65, 1992.

- PILBEAM, D. J.; KIRKBY, E. A. The physiological role of boron in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 6, p. 563-582, 1983.
- PINAZZA, L. A.; BORSARI, F. Aumento o uso de micronutrientes. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, v. 84, p. 50-51, 2004.
- PIRES, C. V.; OLIVEIRA, M. G. A.; ROSA, J. C.; COSTA, N. M. B. Qualidade nutricional escore químico de aminoácidos de diferentes fontes proteicas. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 1, p. 179-187, 2006.
- POERSCH, N. L.; RIBEIRO, N. D.; ROSA, D. P.; POSSOBOM, M. T. D. F. Genetic control of potassium content of common bean seeds. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 6, p. 626-632, jun. 2011.
- PORTES, T. de A.; CARVALHO, J. R. P. de. Área foliar, radiação solar, temperatura do ar e rendimentos em consorciação e em monocultivo de diferentes cultivares de milho e feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 18, n. 7, p. 755-762, 1983.
- POWER, P. P.; WOODS, W. G. The chemistry of boron and its speciation in plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, p. 1-13, 1997.
- PRINGLE, R. M.; EDMANDES, D. C.; SHANNON, P. W.; MANSELL, G. P. Duration of lime effects on the pH of North Island mineral soils. In: JACKSON, B. L. J.; EDMANDES, D. C. (Ed.). **Duration of lime effects on the pH of North Island mineral soils**. Hamilton: Ruakura Soil and Plant Research Station, 1985. p. 25-28.
- QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2000. 111 p.
- QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; FURLANI, A. M. C.; MASCARENHAS, H. A. A. Soybean and sorghum grain yields isopleths for liming and molybdenum rates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 337-344, 1998.
- QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; OWINO-GERROH, C.; ABREU, M. F.; CANTARELLA, H. Peanut response to lime and molybdenum application in low pH soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 659-664, 2004.
- RAHMATULLAH, B.; BAKER, D. E. Magnesium accumulation by corn (*Zea mays* L.) as a function of potassium-magnesium exchange in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 5, p. 899-903, 1981.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agrônoma Ceres: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas-Fundação IAC, 1997. 285 p.

- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Methods used for diagnosis and correction of soil acidity in Brazil: Overview. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., 1996, Belo Horizonte. **Proceedings...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. p. 205-214.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C. A. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. p. 5-39.
- RAMOS, M. L. G.; BODDEY, R. M. Yield and nodulation of *Phaseolus vulgaris* and the competitiveness of an introduced Rhizobium strain: effects of lime, mulch and repeated cropping. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 19, n. 2, p. 171-177, 1987.
- RASMUSSEN, D. C.; GENGENBACH, B. G. Genetics and use of physiological variability in crop breeding. In: TESAR, M. B. (Ed.). **Physiological basis of crop growth and development**. Madison: American Society of Agronomy, 1984. p. 291-321.
- RASSINI, J. B.; REIS, A. E. G. dos; MACEDO, J.; LEITE, J. C. **Caracterização de várzeas na região dos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1984. 16 p. (EMBRAPA-CPAC. Boletim de Pesquisa, 22).
- RAVEN, J. A.; SMITH, F. A. Nitrogen assimilation and transport in vascular land plants in relation to intercellular pH regulation. **New Phytologist**, Oxford, v. 76, p. 415-431, 1976.
- RAZA, S.; JORNSGARD, B.; ABOU-TALEB, H.; CHRISTIANSEN, J. L. Tolerance of *Bradyrhizobium* sp. (Lupini) strains to salinity, pH, CaCO<sub>3</sub> and antibiotics. **Letters in Applied Microbiology**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 379-383, 2001.
- RECHEIGL, J. E.; PAYNE, G. G.; BOTTCHEER, A. B.; PORTER, p. S. Reduced phosphorus application on Bahiagrass and water quality. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 463-468, 1992.
- RECOMENDAÇÕES técnicas para o cultivo do arroz em região favorecidos: zonas 31, 36, 40, 64, 83 e 89. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1992. 124 p.
- REDDY, S. V. **Availability of potassium in different Colorado soils**. 1976. Tese (Mestrado) – Colorado State University, Fort Collins.
- REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface applied amendments. **Agrochimophysics**, Pretoria, v. 4, p. 1-6, 1972.

REID, R. K.; REID, C. P. P.; SZANISTO, P. J. Effects of synthetic and microbially produced chelates on the diffusion of iron and phosphorus to a simulated root in soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 1, p. 45-52, 1985.

REISENAUER, H. M. The effect of sulfur on the absorption and utilization of molybdenum by peas. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madson, v. 27, p. 553-555, 1963.

REISENAUER, H. M.; WALSH, L. M.; HOEFT, R. G. Testing soils for sulphur, boron, molybdenum, and chlorine. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. p. 173-200.

RENGEL, Z.; GRAHAM, R. D. Importance of seed zinc content for wheat growth on zinc deficient soil: II. Grain yield. **Plant and Soil**, The Hague, v. 173, p. 267-274, 1995.

REYNOLDS, M. P.; BALOTA, M.; DELGADO, M. I. B.; AMANI, I.; FISCHER, R. A. Physiological and morphological traits associated with spring wheat yield under hot, irrigated conditions. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 21, n. 6, p. 717-730, 1994.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; ROBAINA, A. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; HORN, D. **Situação da fertilidade dos solos no Estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Ed. da Universidade Federal de Santa Maria, 2001. 32 p. (Boletim técnico, 1).

RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5a. aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

RIBEIRO, N. D.; LONDERO, P. M. G.; CARGNELUTTI FILHO, A.; JOST, E.; POERSCH, N. L.; MALLMANN, C. A. Composição de aminoácidos de cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 10, p. 1393-1399, 2007.

RIBET, J.; DREVON, J. J. Increase in permeability to oxygen and in oxygen uptake of soybean nodules under limiting phosphorus nutrition. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 94, n. 2, p. 298-304, 1995.

RIBET, J.; DREVON, J. J. The phosphorus requirement of  $N_2$  fixing and urea-fed *Acacia mangium*. **New Phytologist**, Cambridge, v. 132, n. 3, p. 383-390, 1996.

RITCHEY, K. D. **O potássio nos Oxissolos e Ultissolos dos trópicos úmido**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato: Instituto Internacional de Potassa, 1982. 69 p. (Boletim técnico, 7).

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of Savanna Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 133, p. 378-382, 1982.

ROBERTSON, L. S.; KNEZEK, B. D.; BELO, J. O. A survey of Michigan soils as related to possible boron toxicities. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 6, n. 3, p. 359-373, 1975.

ROBSON, A. D.; REUTER, D. J. Diagnosis of copper deficiency and toxicity. In: LONERAGAN, J. F.; ROBSON, A. D. (Ed.). **Diagnosis of copper deficiency and toxicity**. London: Academic Press, 1981. p. 287-312.

RODINO, A. P.; FUENTE, M. D. L.; RON, A. M. D.; LEMA, A. J.; DREVON, J. J.; SANTALLA, M. Variation for nodulation and plant yield of common bean genotypes and environment effects on the genotype expression. **Plant and Soil**, The Hague, v. 346, n. 1/2, p. 349-361, 2011.

RODRIGUES, C. S.; LARANJO, M.; OLIVEIRA, S. Effect of heat and pH stress in the growth of chickpea mesorhizobia. **Current Microbiology**, New York, v. 53, n. 1, p. 1-7, 2006.

RODRIGUEZ NAVARRO, D. N.; BUENDIA, A. M.; CAMACHO, M.; LUKAS, M. M.; SANTAMATRIA, C. Characterization of *Rhizobium spp.* Bean isolates from South West Spain. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 32, n. 11/12, p. 1601-1613, 2000.

ROMER, W.; AUGUSTIN, J.; SCHILLING, G. The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars. **Plant and Soil**, The Hague, v. 111, p. 199-201, 1988.

ROMHELD, V.; MARSCHNER, H. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 80, p. 175-180, 1986.

ROMHELD, V.; MARSCHNER, H. Functions of micronutrients in plants. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 297-328.

ROSOLEM, C. A. Adubação potássica em semeadura direta. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1997, Dourados. **Resumos e Palestra...** Dourados: Embrapa, 1997. 12 p.

ROSOLEM, C. A. Brazil: acid soils and agriculture. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW PH, 2., 1990, Beckley. **Proceedings...** Beckley: [s.n.], 1990.



ROSOLEM, C. A. Calagem e adubação mineral. In: ARAÚJO R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. (Ed.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1996. p. 353-390.

ROSOLEM, C. A. **Nutrição e adubação do feijoeiro**. Piracicaba: Potafos, 1987. 93 p.

ROSOLEM, C. A.; CAIRES, E. E. The yield and nitrogen uptake of peanuts as affected by lime, cobalto and molybdenum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, p. 827-835, 1998.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; BRINHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, n. 12, p. 1443-1448, 1984.

ROSOLEM, C. A.; NAKAGAWA, J. Deficiência de manganês em soja induzida por adubação potássica e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, p. 833-836, 1990.

ROSOLEM, C. A.; ZANCANARO, L.; BÍSCARO, T. Boro disponível e resposta da soja em Latossolo Vermelho-Amarelo do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Sol**, Campinas, v. 32, n. 6, p. 2375-2383, 2008.

RUBINS, E. J. Molybdenum deficiencies in the United States. **Soil Science**, v. 81, p. 191-197, 1956.

RUFINI, M.; FERREIRA, P. A. A.; SOARES, B. L.; OLIVEIRA, D. P.; ANDRADE, M. J. B. de; MOREIRA, F. M. S. de. Simbiose de bactérias fixadoras de nitrogênio com feijoeiro-comum em diferentes valores de pH. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 1, p. 81-88, 2011.

RUSSELL, E. W. **Soil conditions and plant growth**. 10<sup>th</sup> ed. London: Longman, 1973. 849 p.

RUSSELL, E. W. **Soil conditions and plant growth**. 11<sup>th</sup> ed. Harlow: Longman Science and Technical, 1988. 991 p.

RYLE, G. J. A.; HESKETH, J. D. Carbon dioxide uptake in nitrogen deficient plants. **Crop Science**, Madison, v. 9, n. 4, p. 451-454, 1969.

SAEED, M.; FOX, R. L. Relations between suspension pH and zinc solubility in acid and calcareous soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 124, p. 199-204, 1977.

SAH, R. N.; BROWN, P. H. Techniques for boron determination and their application to the analysis of plant and soil samples. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, p.15-33, 1997.

- SAKAL, R.; SINGH, A. P. Boron research and agricultural production. In: TONDON, H. L. S. (Ed.). **Micronutrient research and agricultural production**. New Delhi: Fertilizer Development and Consultation Organization, 1995. p. 1-31.
- SALE, P. J. M. Productivity of vegetable crops in a region of high solar input. IV. Field chamber measurements on french bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and cabbage (*Brassica oleracea* L.). **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 2, n. 4, p. 461-470, 1975.
- SALSAC, L.; CHAILLOU, S.; MOROT-GAUDRY, J. F.; LESAINT, C.; JOLIVOE, E. Nitrate and ammonium nutrition in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 25, n. 6, p. 805-812, 1987.
- SÁNCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technologies for managing oxisols and ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, New York, v. 34, p. 279-404, 1981.
- SANDER, D. H.; PENS, E. J.; EGHBALL, B. Residual effects of various phosphorus application methods on winter wheat and grain sorghum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, p.1473-1478, 1990.
- SANTOS, A. B. dos; FAGERIA, N. K.; SILVA, O. F. da; MELO, MEIRE, L. B. de. Resposta do feijoeiro ao manejo de nitrogênio em várzeas tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 11, p. 1265-1271, 2003.
- SANTOS, A. B. dos; FAGERIA, N. K. Características fisiológicas do feijoeiro em várzeas tropicais afetadas por doses e manejo de nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 23-31, 2008.
- SANTOS, A. B. dos; FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, C. Manejo de água e de fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 4, p. 565-573, 1999a.
- SANTOS, A. B. dos; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo de água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 12-16, 2002.
- SANTOS, A. B. dos; SILVEIRA, P. M. da. Cultivo em várzeas. In: ARAUJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. de O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Potafos, 1996. p. 589-617.
- SANTOS, A. B. dos; SILVEIRA, P. M. da; FAGERIA, N. K.; MELO, M. L. B. de. Efeitos de doses de boro e de cobre no feijoeiro em solo de várzea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília, DF. **[Ciência do solo e qualidade de vida: anais]**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999b. 1 CD-ROM.

- SANTOS, A. B. dos; VIEIRA, C.; LOURES, E. G.; BRAGA, M.; THIÉBAUT, J. T. L. Resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao molibdênio e ao cobalto em solos de Viçosa e Paula Cândido, Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 26, p. 92-101, 1979.
- SANTOS, H. G. dos; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; MADARI, B. E. Solo. In: **Agência de Informação Embrapa: Feijão**. Brasília, DF: Embrapa. 2010. Disponível em <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/feijao/arvore/CONTAG01\\_2\\_2072004152820.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/feijao/arvore/CONTAG01_2_2072004152820.html)>. Acesso em: 27 set. 2012.
- SANTOS, J. Z. L.; FURTINI NETO, A. D.; RESENDE, A. V. de; CARNEIRO, L. F.; CURI, N.; MORRETTI, B. da S. Resposta do feijoeiro à adubação fosfatada em solos de Cerrado com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 193-202, 2011.
- SCHAFF, B. E.; SKOGLEY, E. O. Diffusion of potassium, calcium, and magnesium in Bozeman silt loam as influenced by temperature and moisture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 521-524, 1982.
- SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW, F. E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter reading. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 23, n. 17/20, p. 2173-2178, 1992.
- SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solo cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 35, n. 5, p. 1669-1677, 2011.
- SCOOTT, R. S. Long-term studies of molybdenum applied to pasture. III. Rates of molybdenum application in relation to pasture production. **New Zealand Journal of Agriculture Research**, Wellington, v. 6, p. 567-577, 1963.
- SEGOVIA, L.; YOUNG, J. P. W.; MARTINEZ-ROMERO, E. Reclassification of American *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli type I strains as *Rhizobium etli* sp. nov. **International Journal of Systematics Bacteriology**, Washington, DC, v. 43, n. 2, p. 374-377, 1993.
- SELF, J. R.; GUPTA, U. C. Soil testing for boron on alkaline soils. In: GUPTA, U. C. (Ed.). **Boron and its role in crop production**. Boca Raton: CRC Press, 1993. p. 125-135.
- SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M.; NEPOMUCENO, A. L.; OLIVEIRA, M. C. N. eficiência de produtos contendo micronutrientes, aplicados via semente, sobre produtividade e teores de proteína da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 41-45, 1997.
- SHARIF ZIA, M.; ASLAM, M.; ALI, A.; SAEED, Z. Fertilizer management and nitrogen use efficiency for irrigated rice grown on calcareous alkaline soils. In: ANDO, T.; FUJITA, K.; MAE, T.; MATSUMOTO, H.; MORI, S.; SEKIYA, J. (Ed.).

**Plant nutrition for sustainable food production and environment.** Dordrecht: Kluwer, 1997. p. 815-816.

SHARPLEY, A.N.; SMITH, S. J. Mineralization and leaching of phosphorus from soil incubated with surface applied and incorporated crop residue. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 18, p. 101-105, 1989.

SHAVIV, A.; MOHSIN, M.; PRATT, P. F. MATTIGOD, S. V. Potassium fixation characteristics of five Southern California soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 1105-1109, 1985.

SHELP, B. J. Physiology and biochemistry of boron in plants. In: GUPTA, U. C. (Ed.). **Boron and its role in crop production.** Boca Raton: CRC Press, 1993. p. 53-85.

SHIMADA, N. Deficiency and excess of micronutrientes. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K; HIRATA, H. (Ed.). **Science of the rice plant.** Tokyo: Food and Agricultural Policy Research Center, 1995. p. 412-419.

SHINANO, T.; OSAKI, M.; KOMATSU, K.; TADANO, T. Comparison of production efficiency of the harvesting organs among field crops: I. Growth efficiency of the harvesting organs. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 39, n. 2, p. 269-280, 1993.

SHINANO, T.; OSAKI, M.; TADANO, T.  $^{14}\text{C}$  allocation of  $^{14}\text{C}$ -compounds introduced a leaf to carbon and nitrogen components in rice and soybean during ripening. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 40, n. 2, p. 199-209, 1994.

SHINANO, T.; OSAKI, M.; TADANO, T. Comparison of growth efficiency between rice and soybean at the vegetative growth stage. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 41, n. 3, p. 471-480, 1995.

SHORROCKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 172, p. 121-148, 1997.

SHUMAN, L. M. Mineral nutrition. In: WILKINSON, R. E. (Ed.). **Plant-environment interactions.** New York: Marcel Dekker, 1994. p. 149-182.

SHUMAN, L. M. The effect of soil properties on zinc adsorption by soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 39, p. 454-458, 1975.

SHUMAN, L. M.; RAMSEUR, E. L.; DUNCAN, R. R. Soil aluminum effects on the growth and aluminum concentration of sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 313-318, 1990.

SILLANPAA, M. **Micronutrients and the nutrient status of soils:** a global study. Rome: FAO-Finish International Development Agency, 1990. (FAO Soils Bulletin, 63).

- SILVA, C. A.; ABREU, A. de F. B.; RAMALHO, M. A. P.; CARNEIRO, J. E. de S. Implicações da origem das linhagens de feijoeiro na magnitude da interação com ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 7, p. 720-728, 2011.
- SILVA, C. C. da; SILVEIRA, P. M. da. Influência de sistemas agrícolas na resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado à adubação nitrogenada em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 30, n. 1, p. 86-96, 2000.
- SILVA, D. N.; MEURER, E. J.; KAMPF, N.; BORKERT, C. M. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolo do Estado de Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 433-439, 1995.
- SILVA, E. F. da; MARCHETTI, M. E.; SOUZA, L. C. F. de; MERCANTE, F. M.; RODRIGUES E. T.; VITORINI, A. C. T. Inoculação do feijoeiro com *Rhizobium tropici* associada a exsudato de *Mimosa flocculosa* com diferentes doses de nitrogênio. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 443-451, 2009.
- SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. de; LIMA, J. E. F. W. Utilização dos recursos hídricos na agricultura irrigada do Cerrado. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da. (Ed.). **Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 65-92.
- SILVA, J. B. C.; NOVAIS, R. F.; SEDIYAMA, C. S. Comportamento de genótipos de soja em solo com alta saturação de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, p. 287-289, 1984.
- SILVA, J. E. da; RITCHEY, K.D. Adubação potássica em solos de Cerrado. In: YAMADA, T. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 1982. p. 323-338.
- SILVA, L. M. da; LEMOS, L. B.; CRUSCIOL, C. A. C.; FELTRAN, J. C. Sistema radicular de cultivares de feijão em resposta à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 7, p. 701-707, 2004.
- SILVA, T. R. B. da; ARF, O.; SORATTO, R. P. Adubação nitrogenada e resíduos vegetais no desenvolvimento do feijoeiro em sistema plantio direto. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 81-87, 2003.
- SILVA, T. R. B. da; LEMOS, L. B.; TAVARES, C. A. Produtividade e característica tecnológica de grãos em feijoeiro adubado com nitrogênio e molibdênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 739-745, 2006.
- SILVEIRA, P. M. da; BRAZ, A. J. B. P.; DIDONET, A. D. Uso do clorofilômetro como indicador da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura no feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 9, 1083-1087, 2003.

- SILVEIRA, P. M. da; BRAZ, A. J. B. P.; KLIEMANN, H. J.; ZIMMERMANN, F. J. P. Adubação nitrogenada no feijoeiro cultivado sob plantio direto em sucessão de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 4, p. 377-381, 2005.
- SILVEIRA, P. M. da; DAMASCENO, M. A. Doses e parcelamento de K e de N na cultura do feijoeiro irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 28, n. 11, p. 1269-1276, 1993.
- SILVEIRA, P. M. da; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, S. C. da; CUNHA, A. A. da. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 10, p. 2057-2064, 2000.
- SIMS, J. T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper and zinc. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 367-373, 1986.
- SIMS, J. T.; JOHNSON, G. V. Micronutrient soil test. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 417-476.
- SINCLAIR, T. R. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. **Crop Science**, Madison, v. 38, n. 3, p. 638-643, 1998.
- SINGH, B. P.; SINGH, A. P.; SAKAL, R. Differential response of crops to Zn application in calcareous soils. **Journal of Indian Soil Science**, New Delhi, v. 31, p. 534-538, 1983.
- SINGH, M. V. Micronutrient deficiencies in crops and soils in India: an introduction. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). **Micronutrient deficiencies in global crop production**. New York: Springer, 2008. p. 93-125.
- SINGH, S. P. Production and utilization. In: SINGH, S. P. (Ed.). **Common bean improvement in the twenty-first century**. Dordrecht: Kluwer, 1999. p. 1-24.
- SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Transformações bioquímicas e ciclos dos elementos no solo. In: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRO, J. O. (Ed.). **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Ed. Universidade Federal de Lavras, 2002. p. 305-329.
- SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M. ARAUJO, R. S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1994. p. 47-50.
- SMALL, J. G. C.; LEONARD, O. A. Translocation of C<sup>14</sup>-labeled photosynthate in nodulated legumes as influenced by nitrate nitrogen. **American Journal of Botany**, Columbus, v. 56, n. 2, p. 187-194, 1969.

SMITH, B. H.; LEEPER, G. W. The fate of applied molybdate in acid soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 20, p. 246-254, 1969.

SMITH, S. E.; GIANINAZZI-PEARSON, V. Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 39, p.221-244, 1988.

SMYTH, T. J.; CRAVO, M.; BASTOS, J. B. Soil nutrient dynamics and fertility management for sustained crop production on Oxisols in the Brazilian Amazon. In: NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY. **Tropsoils Tech-Report 1985-1986**. Raleigh, 1987. p. 88-91.

SMYTH, T. J.; CRAVO, M.S. Phosphorus management for continuous corn-cowpea production in a Brazilian Amazon Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 305-309, 1990.

SMYTH, T. J.; SANCHEZ, P. A. Phosphate rock dissolution and availability in cerrado soils as affected by phosphorus sorption capacity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 339-345, 1982.

SNYDER, G. H.; JONES, D. B. Prediction and prevention of iron-related rice seedling chlorosis on Everglades Histosols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1043-1046, 1988.

SOARES, A. L. de; FERREIRA, P. A. A. PEREIRA, J. P. A. R.; VALE, H. M. M. do; LIMA, A. S.; ANDRADE, M. J. B. de; MOREIRA, M. de S. Eficiência agrônômica de rizóbios selecionados e diversidade de populações nativas nodulíferas em Perdões (MG): II. Feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 803-811, 2006.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Madison, 2008. 88 p.

SORATTO, R. P.; CARVALHO, M. A. C.; ARF, O. Nitrogênio em cobertura no feijoeiro cultivado em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 259-266, 2006.

SORATTO, R. P.; CARVALHO, M. A. C.; ARF, O. Teor de clorofila e produtividade do feijoeiro em razão da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 9, p. 895-901, 2004.

SORATTO, R. P.; SILVA, T. R. B. da; ARF, O.; CARVALHO, M. A. C. de. Níveis e época de aplicação de nitrogênio em cobertura no feijoeiro irrigado em plantio direto. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 10, p. 89-99, 2001.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E.; GOEDERT, W. J. Manejo da fertilidade do solo no Cerrado. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. da. (Ed.). **Agricultura**

**tropical:** quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 203-260.

SOUSA, D. M. G. de; MIRANDA, L. N. de; LOBATO, E.; CASTRO, L. H. R. de. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, n. 2, p. 193-198, 1989.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado:** correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado:** correção do solo e adubação. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 6 p. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 32).

SOUZA, A. B. de. **Populações de plantas, níveis de adubação e calagem para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) num solo de baixa fertilidade**. 2000. 69 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SOUZA, E. F. C.; SORATTO, R. P.; PAGANI, F. A. Aplicação de nitrogênio e inoculação com rizóbio em feijoeiro cultivado após milho consorciado com braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 4, p. 370-377, 2011.

SPARROW, L. A.; UREN, N. C. Oxidation and reduction of Mn in acidic soils: effect of temperature and soil pH. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 143-148, 1987.

SPRENT, J. I. The effects of water stress on nitrogen fixing root nodules: IV. Effects on whole plants of *Vicia faba* and *Glycine max*. **New Phytologist**, Cambridge, v. 71, n. 4, p. 603-611, 1972.

SPRENT, J. I. Water deficits and nitrogen fixing root nodules. In: KOZLOWSKI, T. T. (Ed.). **Water deficits and plant growth:** soil water measurement, plant response and breeding for drought resistance. New York: Academic Press, 1976. v. 4, p. 291-315.

STAHL, R. S.; JAMES, B. R. Zinc sorption by iron-oxide-coated sand as a function of pH. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1287-1290, 1991a.

STAHL, R. S.; JAMES, B. R. Zinc sorption by manganese-oxide-coated sand as a function of pH. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1291-1294, 1991b.

STALIN, P.; THIYAGARAJAN, T. M.; RAMANATHAN, S.; SUBRAMANIAN, M. Comparing management techniques to optimize fertilizer N application in rice in



the Cauvery Delta of Tamil Nadu, India. **International Rice Research Notes**, Los Baños, v. 25, n. 2, p. 25-26, 2000.

STEVENS, J. J.; BLANCHARD, R. W. Soil pH gradient near calcite and dolomite particles. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 967-972, 1992.

STEVENSON, F. J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 380 p.

STOCCO, P.; SANTOS, J. C. P. dos; VARGAS, V. P.; HUNGRIA, M. Avaliação da biodiversidade de rizóbios simbiotes do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) em Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 1107-1120, 2008.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Irrigação por subirrigação. In: AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. (Ed.). **Produção do feijoeiro comum em várzeas tropicais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 67-72.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 3, p. 1473-481, 2001.

STONE, L. F.; SILVA, G. de M.; MOREIRA, J. A. A. Uso do clorofilômetro SPAD-502 na estimativa do nitrogênio foliar específico e da produtividade do feijoeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 7., 2002, Viçosa, MG. **Resumos expandidos...** Viçosa, MG: Ed. da UFV, 2002. p. 743-746.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999.

STOUT, P. R.; MEAGHER, W. R.; PEARSON, G. A.; JOHNSON, C. M. Molybdenum nutrition of crop plants: I. The influence of phosphate and sulfate on the absorption of molybdenum from soils and solution cultures. **Plant Soil**, [S.l.], v. 3, p. 51-87, 1951.

STOUT, W. L. Potassium and magnesium, recovery from selected soils of the Allegheny plateau. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 1023-1027, 1982.

STRALIOTTO, R.; TEIXEIRA, M. G.; MERCANTE, F. M. Fixação biológica de nitrogênio. In: AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. (Ed.). **Produção de feijoeiro comum em várzeas tropicais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 122-153.

STUMPE, J. M.; VLEK, P. L. G. Acidification induced by nitrogen sources in columns of selected tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 145-151, 1991.

- SU, C.; EVANS, L. J.; BATES, T. E.; SPIERS, G. A. Extractable soil boron and alfalfa uptake: calcium carbonate effects on acid soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1445-1450, 1994.
- SUMNER, M. E.; RADCLIFFE, D. E.; MCCRAY, M.; CARTER, E.; CLARK, R. L. Gypsum as an ameliorant for subsoil hardpans. **Soil Technology**, Cremlingen, v. 3, p. 253-258, 1990.
- SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J.; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil profile through deep liming and surface application of gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1254-1278, 1986.
- TABATABAI, M. A. Importance of sulfur in crop production. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 1, p. 45-62, 1984.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 34, p. 225-229, 1970.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Distribution of total and available sulfur in selected soils and soil profiles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 40-44, 1972.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TAKKAR, P. N.; WALKER, C. D. The distribution and correction of zinc deficiency. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in soils and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 151-166.
- TANAKA, A.; FUJITA, K. Growth, photosynthesis and yield components in relation to grain yield of the field bean. **Journal of the Faculty of Agriculture Hokkaido University**, Sapporo, v. 59, n. 2, p. 145-238, 1979.
- TANAKA, A.; OSAKI, M. Growth and behavior of photosynthesized  $^{14}\text{C}$  in various crops in relation to productivity. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 29, n. 2, p. 147-158, 1983.
- TAYLOR, G. J.; MACFIE, S. M. Modeling the potential for boron amelioration of aluminum toxicity using the Weibull function. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 72, p. 1187-1196, 1994.
- TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A.; ARAÚJO, G. A. de; ANDRADE, M. J. B. de. Teores de nutrientes e qualidade fisiológica de sementes de feijão em resposta à adubação foliar com manganês e zinco. **Bragantia**, Campinas, v. 64, p. 83-88, 2005.
- TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A.; ARAÚJO, G. A. A.; FONTES, R. L. F. Manganese and zinc leaf application on common bean grown on a Cerrado soil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 77-81, 2004.
- Terry, N.; Abadia, J. Function of iron in chloroplasts. **Journal of Plant Nutrition**, [S.l.], v. 9, p. 609-646, 1986.

THUNG, M. D. T.; OLIVEIRA, I. P. de. **Problemas abióticos que afetam a produção do feijoeiro e seus métodos de controle**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa-CNPAP, 1998. 172 p.

TIFFIN, L. O. Translocation of iron citrate and phosphorus in xylem exudate of soybean. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 45, p. 280-283, 1970.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4<sup>th</sup> ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1985. 754 p.

TISDALE, S. L.; RENEAU JUNIOR, R. B.; PLATOU, J. S. Atlas of sulfur deficiencies. In: TABATABAI, M. A. (Ed.). **Sulfur in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 295-322. (American Society of Agronomy. Agronomy, 27).

TONER, C. V.; SPARKS, D. L. Chemical relaxation and double layer model analysis of boron adsorption on alumina. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 395-404, 1995.

TRACY, P. W.; WESTFALL, D. G.; ELLIOTT, E. T.; PETERSON, G. A. Tillage influence on soil sulfur characteristics in winter wheat-summer fallow systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1630-1634, 1990.

TRAN, D. V. Main issue on rice production on wet acid soils of the tropics. In: DETURCK, P.; PONNAMPERUMA, F. N. (Ed.). **Rice production on acid soils of the tropics**. Kandy: Institute of Fundamental Studies, 1991. p. 87-95.

TSADILAS, C. D.; YASSOGLOU, N.; KOSMAS, C. S.; KALLIANOU, C. H. The availability of soil boron fractions to olive trees and barley and their relationships to soil properties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 162, p. 211-217, 1994.

TSAI, S. M.; BONETTI, R.; AGBALA, S. M.; ROSSETO, R. Minimizing the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in common bean by increasing nutrient levels. **Plant and Soil**, The Hague, v. 152, n. 1, p. 131-138, 1993.

TURNER, F. T.; JUND, M. F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwarf rice. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 5, p. 926-928, 1991.

URIBE, E.; COX, F. R. Soil properties affecting the availability of potassium in highly weathered soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 148-152, 1988.

VADEZ, V.; RODIER, F.; PAYRE, H.; DREVON, J. J. Nodule permeability to O<sub>2</sub> and nitrogenase linked respiration in bean genotypes varying in the tolerance of N<sub>2</sub> fixation to P deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 34, n. 6, p. 871-878, 1996.

- VALADÃO, F. C. de A.; JAKELAITIS, A.; CONUS, L. A.; BORCHART, L.; OLIVEIRA A. A. de; VALADÃO JUNIOR, D. D. Inoculação das sementes e adubação nitrogenada e molíbdica do feijoeiro comum, em Rolim de Moura, RO. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 4, p. 741-747, 2009.
- VARVEL, G. E.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 4, p. 1233-1239, 1997.
- VENCOVSKY, R.; RAMALHO, M. A. P. Contribuições do melhoramento genético de plantas no Brasil. In: PATERNIANI, E. (Ed.). **Ciência, agricultura e sociedade**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. p. 41-74.
- VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VIEIRA, N. M. B.; ALVES JUNIOR, J.; FRANZOTE, B. P.; ANDRADE, M. J. B. de; CARVALHO, J. G. de. Aplicação foliar com molibdênio na cultura do feijoeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE FEIJÃO, 8., 2005, Outubro 18-20, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2005a. p. 922-925.
- VIEIRA, R. F.; CARDOSO, E. J. B. N.; VIEIRA, C.; CASSINI, S. T. A. Foliar application of molybdenum in common bean: I. Nitrogenase and reductase activities in a soil of high fertility. **Journal of Plant Nutrition**, Wiley, v. 21, p. 169-180, 1998a.
- VIEIRA, R. F.; CARDOSO, E. J. B. N.; VIEIRA, C.; CASSINI, S. T. A. Foliar application of molybdenum in common bean: III. Effect on nodulation. **Journal of Plant Nutrition**, Wiley, v. 21, p. 2153-2161, 1998b.
- VIEIRA, R. F.; TSAI, S. M.; TEIXEIRA, M. A. Nodulação e fixação simbiótica de nitrogênio em feijoeiro com estirpes nativas de rizóbio, em solo tratado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 40, n. 10, p. 1047-1050, 2005b.
- VILLA, M. R.; FERNANDES, L. A.; FAQUIN, V. Formas de potássio em solos de várzea e sua disponibilidade para o feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 649-658, 2004.
- VITTI, G. C. **Uso eficiente do gesso agrícola na agropecuária**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura, Luiz de Queiroz, 2000. 30 p.
- VITTI, G. C.; NOVAES, N. J. Adubação com enxofre. In: MATOS, H. B.; WERNER, J. C.; YAMADA, T.; MALAVOLTA, E. **Calagem e adubação de pastagens**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e Fósforo, 1986. p. 191-231.

VOSE, P. B. Iron nutrition in plants: a world review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 5, p. 233-249, 1982.

WAGNER, B. I.; STEWART, J. W. B.; MOIR, J. O. Changes with time in the form and availability of residual fertilizer phosphorus on chernozemic soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 66, p. 105-119, 1986.

WALLACE, A.; LUNT, O. R. Iron chlorosis in horticulture plants: A review. **Journal of American Society of Horticulture Science**, [S.l.], v. 75, p. 819-841, 1960.

WALLACE, D. H.; OZBUN, J. L.; MUNGER, H. M. Physiological genetics of crop yield. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 97-146, 1972.

WALLACE, T. **The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms**. 2nd ed. New York: Chemical, 1961. 125 p.

WARNCKE, D. D.; BARBER, S. A. Diffusion of zinc in soil: III. Relation to zinc adsorption isotherm. **Soil Science Society of America Proceeding**, Madison, v. 37, p. 355-358, 1973.

WASKOM, R. M.; WESTFALL, D. G.; SPELLMAN, D. E.; SOLTANPOUR, P. N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 27, n. 3/4, p. 545-560, 1996.

WAUGHMAN, G. J. The effect of temperature on nitrogenase activity. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 28, n. 4, p. 949-960, 1977.

WELCH, L. F.; MULVANEY, D.L.; BOONE, L.V.; MCKIBBEN, G. E.; PENDLETON, J.W. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 58, p. 283-287, 1966.

WELCH, R. M. Zinc concentrations and forms in plants for human and animals. In: ROBSON, A. D. (Ed.). **Zinc in soil and plants**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 183-195.

WELCH, R. M.; ALLAWAY, W. H.; HOUSE, W. A.; KUBOTA, J. Geographic distribution of trace element problems. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 31-37.

WELCH, R. M.; HOUSE, W. A.; BEEBE, S.; CHENG, Z. Genetic selection for enhanced bioavailable levels of iron in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 48, n. 8, p. 3576-3580, 2000.

WELCH, R. W.; YONG, Y. Y. The effects of variety and nitrogen fertilizer on protein production in oats. **Journal of the Science and Food Agriculture**, London, v. 31, n. 6, p. 541-548, 1980.

WIETHOLTER, S. **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 104 p.

WILCOX, G. E.; FAGERIA, N. K. **Deficiências nutricionais do feijão, sua identificação e correção**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1976. 21 p. (EMBRAPA-CNPAP. Boletim técnico, 5).

WILKINSON, S. R.; GRUNES, D. L.; SUMNER, M. E. Nutrient interactions in soil and plant nutrition. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC, 2000. p. 89-111.

WILLIAMS, C. H. Soil acidification under clover. **Australian Journal of Experimental Agricultural and Animal Husbandry**, Victoria, v. 20, p. 561-567, 1980.

WIREN, N. V.; GAZZARRINI, S.; FROMMER, W. B. Regulation of mineral nitrogen uptake in plants. In: ANDO, T.; FUJITA, K.; MAE, T.; MATSUMOTO, H.; MORI, S.; SEKIYA, J. (Ed.). **Plant nutrition for sustainable food production and environment**. Dordrecht: Kluwer, 1997. p. 41-49.

WISSEMEIER, A. H.; HORST, W. J. Simplified methods for screening cowpea cultivars for manganese leaf tissue tolerance. **Crop Science**, Madison, v. 31, p. 435-439, 1991.

WOOD, C. W.; TRACY, P. W.; REEVES, D. W.; EDMISTEN, K. L. Determination of cotton nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 9, p. 1435-1448, 1992.

WORRALL, V. S.; ROUGHLEY, R. J. The effect of moisture stress on infection of *Trifolium subterraneum* L. by *Rhizobium trifolii*. **Journal of Experimental Botany**, [S.l.], v. 27, n. 6, p. 1233-1241, 1976.

XU, J. M.; WANG, K.; BELL, R. W.; YANG, Y. A.; HUANG, L. B. Soil boron fractions and their relationship to soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n.1, p. 133-138, 2001.

YANG, Y. H.; ZHANG, H. Y. Boron amelioration of aluminum toxicity in mungbean seedlings. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 21, n. 5, p. 1045-1054, 1998.

YERMIYAHU, U.; KEREN, R.; CHEN, Y. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 405-409, 1995.

YOSHIDA, S. Factors that limit growth and yields of upland rice. In: IRRI (Ed.). **Upland rice**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1975. p. 46-71.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: International Rice Research Institute, 1981. 269 p.

YOSHIDA, S. Physiological aspects of grain yield. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 23, p. 437-464, 1972.

ZHANG, M.; ALVA, A. K.; LI, Y. C.; CALVERT, D. V. Chemical association of Cu, Zn, Mn, and Pb in selected Sandy citrus soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, p. 181-188, 1997.

ZHANG, X.; ZHANG, F.; MAO, D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.). Zinc uptake by Fe-deficient rice. **Plant and Soil**, The Hague, v. 202, n. 1, p. 33-39, 1998.

ZHU, B.; ALVA, A. K. Distribution of trace metals in some Sandy soils under citrus production. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 350-355, 1993.



Na Livraria Embrapa, você encontra  
livros, e-books, DVDs e CD-ROMs sobre  
agricultura, pecuária, negócio agrícola, etc.

Para fazer seu pedido, acesse:  
**[www.embrapa.br/livraria](http://www.embrapa.br/livraria)**

ou entre em contato conosco  
**Fone: (61) 3448-4236**  
**Fax: (61) 3448-2494**  
**[livraria@embrapa.br](mailto:livraria@embrapa.br)**

Você pode também nos encontrar nas redes sociais:



[facebook.com/livrariaembrapa](https://facebook.com/livrariaembrapa)



[twitter.com/livrariaembrapa](https://twitter.com/livrariaembrapa)



*Impressão e acabamento*  
**Embrapa Informação Tecnológica**

*O papel utilizado nesta publicação foi produzido conforme  
a certificação do Bureau Veritas Quality International (BVQI) de Manejo Florestal*



## Arroz e Feijão

A nutrição mineral refere-se ao suprimento, à absorção e à utilização de nutrientes essenciais pelas plantas. Esse processo é influenciado pelo clima, pela qualidade do solo e pela interação das plantas entre elas próprias e com o meio. A produtividade das culturas depende de vários fatores, e a disponibilidade de nutrientes, na quantidade e na proporção adequadas, constitui um dos principais. O uso racional de fertilizantes e corretivos é fundamental numa agricultura moderna, pois, além de contribuir para o aumento da produtividade e redução do custo da produção, diminui o risco de poluição do meio ambiente.

Este livro aborda temas relevantes sobre a cultura do feijoeiro, como o manejo de nutrientes, a caracterização dos solos onde se cultiva essa leguminosa e a fisiologia da produção. Apresenta ainda o estado da arte na área de nutrição mineral e a discussão sobre os resultados de pesquisa desenvolvida na região do Cerrado, local de maior área cultivada com o feijoeiro.

Trata-se, portanto, de uma obra de interesse para professores, pesquisadores, estudantes de agronomia, extensionistas e produtores.

