

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

A Cultura do Arroz no Brasil

*2ª Edição
Revisada e ampliada*

Alberto Baêta dos Santos
Luís Fernando Stone
Noris Regina de Almeida Vieira
Editores Técnicos

*Embrapa Arroz e Feijão
Santo Antônio de Goiás, GO
2006*

Exemplares desta publicação devem ser solicitados à:

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) 3533-2100
sac@cnpaf.embrapa.br
www@cnpaf.embrapa.br

Embrapa Informação Tecnológica

Parque Estação Biológica (PqEB), Av. W3 Norte (final)
Fone: (61) 3340-9999
Fax: (61) 3340-2753
CEP 70770-901 - Brasília, DF
vendas@sct.embrapa.br
www.sct.embrapa.br

Supervisor Editorial: *Marina A. Souza de Oliveira*

Revisor de Texto: *Noris Regina de Almeida Vieira*

Normalização Bibliográfica: *Ana Lúcia Delalibera de Faria*

Tratamento das Ilustrações: *Sebastião José de Araújo e Fabiano Severino*

Editoração Eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

1ª impressão (1999): 1.000 exemplares

2ª edição

1ª impressão (2006): 2.000 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 Arroz e Feijão

A cultura do arroz no Brasil / editores, Alberto Baêta dos Santos, Luís Fernando Stone, Noris Regina de Almeida Vieira. - 2. ed. rev. ampl. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p. : il. ; 23 cm.

ISBN 85-7437-030-4

1. Arroz - Produção. 2. Arroz - Tecnologia. 3. Arroz - Pesquisa. I. Santos, Alberto Baêta dos, *ed.* II. Stone, Luís Fernando, *ed.* III. Vieira, Noris Regina de Almeida, *ed.* IV. Embrapa Arroz e Feijão.

CDD 633.18 (21. ed.)

© Embrapa 2006

Nutrição Mineral

Nand Kumar Fageria

RESUMO - A nutrição mineral refere-se ao suprimento, à absorção e à utilização de nutrientes essenciais pela planta. A produtividade das culturas é influenciada por vários fatores e a disponibilidade de nutrientes, na quantidade e na proporção adequadas, constitui um dos principais. Para o crescimento normal das culturas são considerados 16 nutrientes essenciais: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), molibdênio (Mo), boro (B) e cloro (Cl). Em solo de Cerrados, a deficiência de P é a que mais limita a produtividade da cultura de arroz, enquanto em solo de várzea, é a deficiência de N, seguida das de P e K. Os principais métodos de avaliação da deficiência nutricional são a observação dos sintomas visuais e a realização de análises químicas da planta e do solo. No Brasil, a análise de solos é comumente usada para avaliar a necessidade nutricional das culturas. A otimização da eficiência nutricional é fundamental para aumentar a produtividade e reduzir o custo de produção. Vários fatores, como clima, solo, planta e suas interações afetam a absorção e a utilização de nutrientes pelas plantas. Para a eficiência máxima de nutrientes, todos estes fatores devem ter nível ótimo durante o desenvolvimento da cultura. Um modelo de manejo integrado de nutrientes é apresentado neste capítulo.

INTRODUÇÃO

A nutrição mineral envolve o fornecimento, a absorção e a utilização de nutrientes essenciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Os nutrientes essenciais para as plantas estão relacionados na Fig. 11.1, e suas formas de absorção, na Tabela 11.1. A essencialidade dos nutrientes C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S e Fe foi descoberta entre 1806 e 1865, e a dos nutrientes Mn, Cu, Mo, B e Cl, entre 1922 e 1954 (Glass, 1989). Os critérios de essencialidade são: 1) na ausência do nutriente em questão, a planta não completa o seu ciclo de vida; 2) o nutriente não pode ser substituído por nenhum outro, por mais parecido que seja; e 3) o nutriente em questão afeta diretamente a vida da planta, em vez de, com sua presença, simplesmente modificar condições básicas, químicas ou biológicas do meio, desfavoráveis à planta. Com base nestes critérios, 16 nutrientes foram evidenciados até agora como essenciais às plantas. É importante salientar que a essencialidade de cada um foi estabelecida em solução nutritiva como meio de crescimento da planta. A solução nutritiva oferece a oportunidade de manipulação da concentração e da proporção de nutrientes, que não pode ser obtida facilmente utilizando-se solo como meio de crescimento. Desse modo, a



técnica de solução nutritiva é considerada fundamental para a pesquisa básica na área de nutrição de plantas.

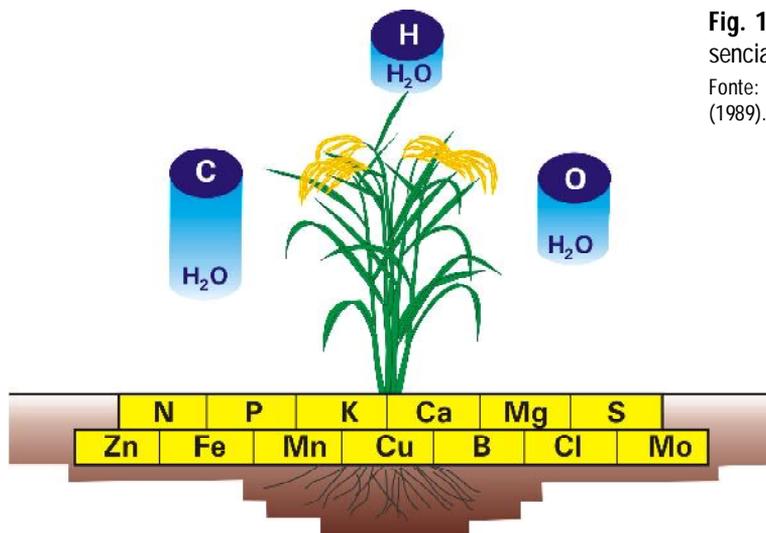


Fig. 11.1. Nutrientes essenciais para as plantas.

Fonte: Adaptada de Fageria (1989).

Tabela 11.1. Principais formas de absorção dos nutrientes essenciais para as plantas.

Nutriente	Forma de absorção	Nutriente	Forma de absorção
Carbono (C)	CO ₂	Enxofre (S)	SO ₄ ²⁻ , SO ₂
Oxigênio (O)	H ₂ O, O ₂	Zinco (Zn)	Zn ²⁺
Hidrogênio (H)	H ₂ O	Ferro (Fe)	Fe ²⁺ , Fe ³⁺
Nitrogênio (N)	NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻	Manganês (Mn)	Mn ²⁺
Fósforo (P)	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	Boro (B)	H ₃ BO ₃
Potássio (K)	K ⁺	Cobre (Cu)	Cu ²⁺
Cálcio (Ca)	Ca ²⁺	Molibdênio (Mo)	MoO ₄ ²⁻
Magnésio (Mg)	Mg ²⁺	Cloro (Cl)	Cl ⁻

Fonte: Fageria et al. (1997).

Os nutrientes N, P, K, Ca, Mg e S são requeridos em maior quantidade, sendo, por isso, chamados de macronutrientes. Por outro lado, os nutrientes Zn, Fe, Mg, Cu, B e Mo são necessários em pequena quantidade e são chamados de micronutrientes. A planta acumula Cl em quantidade quase igual a dos macronutrientes mas este nutriente é classificado como micronutriente porque a quantidade necessária para a planta é pequena (Mengel et al., 2001; Fageria et al., 2002). Todos os nutrientes são igualmente importantes para o crescimento da planta e a separação entre macro e micronutrientes obedece ao critério quantitativo. Os macronutrientes participam na formação da estrutura da planta e, por



isso, são necessários em maior quantidade. Os micronutrientes participam principalmente em processos enzimáticos da planta, sendo exigidos, portanto, em menor quantidade (Marschner, 1986).

FUNÇÕES DOS NUTRIENTES

Cada nutriente desempenha funções definidas dentro da planta e todos devem atuar conjuntamente para produzir melhores resultados. Neste sentido, com base em resultados obtidos na Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás, GO, é apresentado, na Fig. 11.2, um exemplo dos efeitos da aplicação de N, P e K no crescimento do arroz. A produtividade máxima foi obtida com a presença dos três nutrientes aplicados juntos, em quantidades adequadas. Quando cada um destes nutrientes foi omitido no solo, a produtividade da massa seca da parte aérea diminuiu significativamente. Nas Fig. 11.3, 11.4 e 11.5 é mostrado o crescimento da planta de arroz com e sem N, P e K. Para o arroz de terras altas, em solos de Cerrados, o fósforo é relativamente mais limitante, seguido do nitrogênio e do potássio. Fageria & Baligar (1997a, 2001) também relataram que o P limita mais a produtividade do arroz de terras altas em solo de Cerrados que qualquer outro nutriente. O P também é importante no desenvolvimento do sistema radicular do arroz de terras altas (Fig. 11.6). No sistema de cultivo irrigado com lâmina de água, em solos de várzea, o N é mais limitante do que o P e o K (Fageria et al., 2003). Desse modo, para a cultura de arroz, deve ser dada maior ênfase à pesquisa para P em solos de Cerrados, e para N, em solos de várzea. As funções mais importantes de cada nutriente essencial estão resumidas na Tabela 11.2.

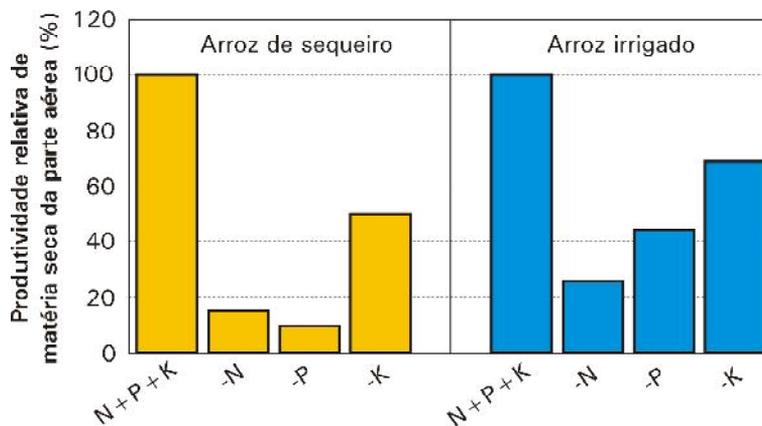


Fig. 11.2. Resposta da planta de arroz à aplicação de N, P e K em solos de Cerrados e de várzea. Fonte: Adaptada de Baligar & Fageria (1997); Fageria et al. (1997).



Foto: Embrapa Arroz e Feijão

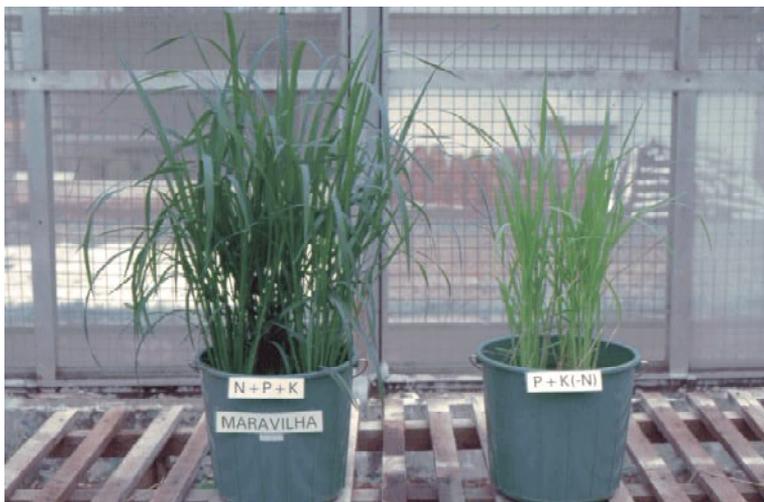


Fig. 11.3. Crescimento da planta de arroz de terras altas com a aplicação de N, P e K (esquerda) e sem N (direita).

Foto: Embrapa Arroz e Feijão

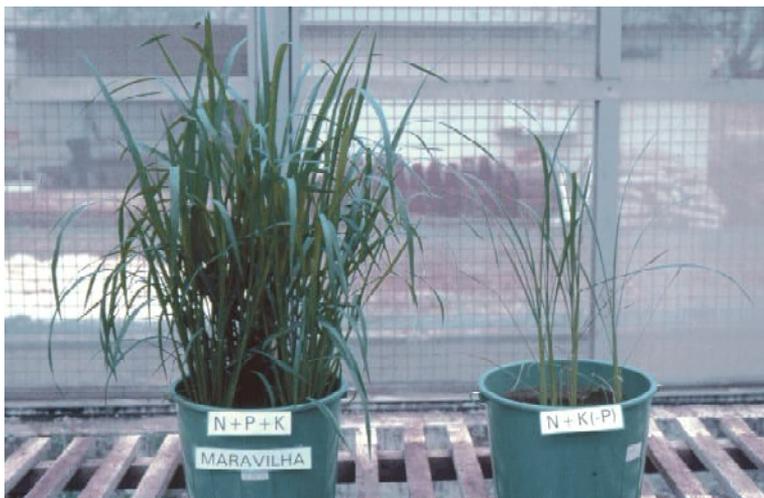


Fig. 11.4. Crescimento da planta de arroz de terras altas com a aplicação de N, P e K (esquerda) e sem P (direita).



Foto: Embrapa Arroz e Feijão

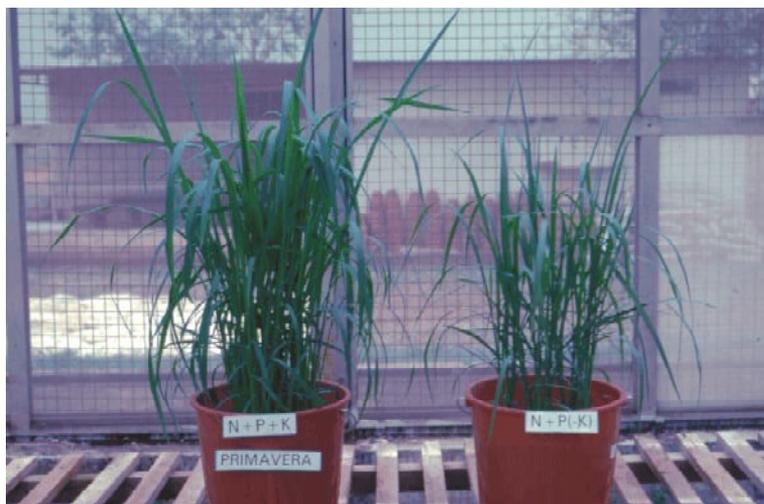


Fig. 11.5. Crescimento da planta de arroz de terras altas com a aplicação de N, P e K (esquerda) e sem K (direita).

Foto: Embrapa Arroz e Feijão



Fig. 11.6. Influência de doses crescentes de P (0, 50 e 175 mg P kg⁻¹ de solo) no desenvolvimento do sistema radicular do arroz de terras altas.



Tabela 11.2. Principais funções dos nutrientes essenciais na planta.

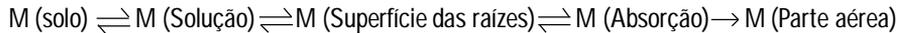
Nutriente	Função
Carbono	Componente básico de carboidratos, proteínas, lipídios e ácidos nucleicos.
Oxigênio	Mais ou menos igual ao carbono. Faz parte de compostos em quase todas as partes da planta.
Hidrogênio	Exerce papel importante no metabolismo da planta, no balanço iônico e na energia celular. É o principal agente de redução.
Nitrogênio	Componente de vários compostos orgânicos, como proteínas e ácidos nucleicos. Aumenta o número de panículas, o número e a massa dos grãos e, também, o sistema radicular.
Fósforo	Exerce papel central na transferência de energia e no metabolismo de proteínas. Também aumenta o sistema radicular, o número de panículas e o número e a massa dos grãos.
Potássio	Ajuda na regulação osmótica e iônica. Funciona como co-fator ou ativador para várias enzimas de carboidratos e do metabolismo de proteínas. Aumenta o sistema radicular do arroz.
Cálcio	Envolvido na divisão celular, desempenha papel importante na manutenção da integridade das membranas.
Magnésio	Componente da clorofila e ativador enzimático.
Zinco	Componente essencial de várias enzimas.
Ferro	Ativador de enzimas de transportadores de elétrons.
Manganês	Envolvido no sistema de evolução de O ₂ da fotossíntese e componente das enzimas arginase e fosfotransferase da parede celular.
Boro	Envolvido no metabolismo de carboidratos e na síntese de componentes da parede celular.
Cobre	Constituinte de várias enzimas.
Molibdênio	Fixador de N ₂ e redutor de NO ₃ ⁻ .
Cloro	Essencial para o processo de fotossíntese como ativador das enzimas que desdobram H ₂ O. Também é importante na osmoregulação de plantas em solos salinos.

Fonte: Fageria et al. (1997).



ABSORÇÃO DE NUTRIENTES

Para o desenvolvimento normal das plantas, é necessário o transporte contínuo de nutrientes do sistema solo para o sistema planta. Nesse processo, quatro fases são importantes: a constante liberação de nutrientes da fase sólida para a solução do solo; a sua movimentação na forma solúvel para a superfície das raízes; a absorção pelas raízes; e a translocação para a parte aérea. Esse processo pode ser explicado como segue:



onde M = nutriente.

Observa-se na Fig. 11.7, de modo esquemático, a absorção e o transporte de nutrientes no sistema solo-planta. Este processo é governado por três fatores principais: as condições do solo; o tipo de nutriente; e as características da planta. A movimentação dos nutrientes do solo para as raízes, em quantidade adequada, é o primeiro passo no processo de absorção, e pode ocorrer por meio de intercepção radicular, fluxo de massa ou difusão.

Intercepção radicular

Ao desenvolver-se, o sistema radicular encontra-se com os nutrientes que são, então, absorvidos pelas raízes. A quantidade de nutrientes interceptados pelas raízes varia conforme a espécie vegetal, o nutriente e as condições do solo.

A contribuição aproximada da intercepção radicular na absorção de nutrientes pode ser calculada com base nos seguintes critérios: a) a quantidade máxima interceptada é a disponível no volume de solo ocupado pelas raízes; b) as raízes ocupam, em média, 1% do volume total do solo; c) aproximadamente 50% do volume total do solo é constituído de espaço poroso; as raízes, no entanto, ocupam, aproximadamente, apenas 2% deste espaço.

Com base nestes critérios, o Ca é o único nutriente fornecido em quantidade maior que a necessidade da planta, pelo processo de intercepção. Outros nutrientes, como Mg, Zn e Mn, são fornecidos em quantidades aproximadamente iguais a um terço dos requerimentos da planta. Embora os valores absolutos não possam ser determinados, é lógico que a intercepção radicular pode fornecer mais nutrientes se a planta possuir um sistema radicular extenso e se a concentração de nutrientes disponíveis na zona radicular for alta.



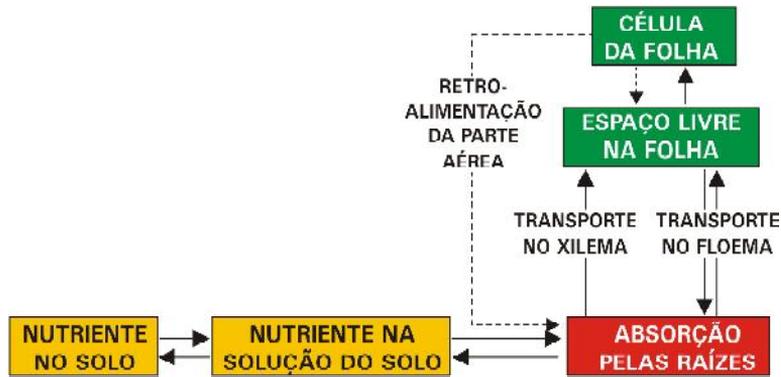


Fig. 11.7. Representação esquemática da absorção e do transporte de nutrientes no sistema solo-planta.

Fonte: Adaptada de Fageria et al. (1997).

Fluxo de massa

O movimento dos nutrientes para a superfície das raízes, por fluxo de massa, é o produto da taxa de absorção de água por unidade de raízes pela concentração de nutrientes na solução do solo. Geralmente, o fluxo de massa é responsável pelo suprimento total de N, Ca, Mg, S, Mn, Cu, B e Mo.

Difusão

Quando o fornecimento de um dado nutriente às raízes, pelos processos iniciais de interceptação e fluxo de massa, é menor que o absorvido pelas plantas, a concentração desse nutriente na superfície das raízes diminui. Nessa situação, estabelece-se um gradiente de concentração em direção às raízes e ocorre a difusão do nutriente. A reposição dos nutrientes para as raízes e a taxa de absorção são reguladas principalmente pela taxa de difusão, que segue a lei de Fick:

$$F = -DA (\partial c / \partial x)$$

onde: **F** = taxa de difusão; **D** = coeficiente de difusão; **A** = área de difusão; e $\partial c / \partial x$ = gradiente de concentração.

A equação apropriada para a difusão de nutrientes para as raízes, na forma circular, é muito complexa. A versão simplificada desta equação é dada por Barber (1984):

$$F = -A [(C - C_0) D k / r_0]$$



onde: C = concentração inicial de nutrientes no solo; C_0 = concentração na superfície da raiz; r_0 = raio da raiz; k = função decrescente de Dt/r_0^2 ; e t = tempo em que o dreno está em operação.

As plantas absorvem os nutrientes adjacentes às raízes, formando, dessa maneira, um dreno para a difusão dos nutrientes. Praticamente toda a quantidade de P e de K e quase um terço da quantidade de Zn e de Fe necessária para as plantas é fornecida pelo processo de difusão.

TRANSPORTE DE ÍONS

Antes de discutir o processo de transporte, é interessante distinguir os processos de **absorção**, **transporte** e **redistribuição**, conforme Malavolta (1980): a absorção corresponde à entrada do elemento, em forma iônica ou molecular, nos espaços intercelulares ou em qualquer parte do organismo celular (parede, membrana, citoplasma, vacúolo, mitocôndria, cloroplasto, etc.); o transporte, ou translocação, é a transferência do elemento, em qualquer forma (igual ou diferente da forma de absorção), de um órgão, ou região de absorção, para outro qualquer; e redistribuição é a transferência do elemento de um órgão para outro, de uma região de residência para outra, em forma igual ou diferente da absorvida.

Processo ativo e passivo

Os íons, na solução, são submetidos a duas forças físicas principais. Uma origina-se do gradiente de potencial químico e a outra, do gradiente de potencial elétrico. O transporte dos íons ocorre da concentração alta para a baixa. Quando os íons atuam pelo gradiente elétrico, os cátions são atraídos para o eletropotencial negativo, e os ânions, para o potencial positivo. Então, o transporte de íons depende do gradiente de potencial eletroquímico. A célula viva possui carga positiva em relação à solução externa. Por esta razão, quando se considera o transporte de íons através do plasmalema ou do tonoplasto, deve-se levar em conta a existência de gradiente de concentração e de gradiente de potencial elétrico entre a solução externa e a interna (citoplasma). A difusão de cátions, como foi discutido anteriormente, é um exemplo típico de que o transporte de cátions ocorre ao longo do gradiente elétrico. Esta movimentação interna de cátions atinge o equilíbrio entre a força elétrica e a cinética, que é responsável pela movimentação catiônica. Este equilíbrio é explicado pela equação de Nernst. Um exemplo simples pode explicar isto: uma



solução aquosa de KCl é separada por uma membrana permeável a ambos os íons, K⁺ e Cl⁻. Admitindo-se que o potencial elétrico através da membrana é E, o equilíbrio para K⁺ e Cl⁻ será atingido tão logo a concentração destes íons, nos dois lados da membrana, satisfaça a equação de Nernst. Este processo é explicado pela seguinte equação (Mengel et al., 2001):

$$\Psi_i - \Psi_e = E = \frac{RT}{Z.F} \ln \frac{[K_e^+]}{[K_i^+]} = \frac{RT}{Z.F} \ln \frac{[Cl_i^-]}{[Cl_e^-]}$$

onde: Ψ_i = carga elétrica interna (citoplasma); Ψ_e = carga elétrica externa (solução nutritiva); **R** = constante de gases; **T** = temperatura absoluta; **F** = carga elétrica em Faraday; e **Z** = valência dos íons.

Os símbolos “i” e “e” indicam, respectivamente, solução interna e externa, e os valores entre parênteses indicam concentração ou, mais precisamente, atividade de íons. Esta equação pode ser derivada, quando E é menor que 0 (a célula possui carga negativa), o valor $[K_e^+]/[K_i^+]$ deve ser menor que 1. Isto significa que, sob condições de equilíbrio, ocorre acúmulo de K⁺ na solução interna. Quando o valor de $[Cl_i^-]/[Cl_e^-]$ é menor que 1, significa que, em equilíbrio, a concentração de Cl⁻ na solução externa é mais alta que na solução interna. A concentração de cátions no citoplasma pode, portanto, ser muitas vezes maior que na solução externa, sem necessidade de transporte de cátions contra o gradiente eletroquímico. Por exemplo, se a concentração de K⁺ da solução interna é dez vezes maior que a da solução externa, o valor $\log [K_e^+]/[K_i^+]$ é igual a 1. A diferença de potencial elétrico correspondente é -58 mV (Dainty, 1962). Para células vivas, -58 mV é um valor muito pequeno. Este exemplo mostra que K⁺ e outros cátions podem ser acumulados nas células com força física.

Quando a concentração é maior sob condições equilibradas, deve ter ocorrido transporte contra o gradiente eletroquímico. Do ponto de vista termodinâmico, o transporte contra o gradiente eletroquímico é chamado transporte ativo e, quando é feito ao longo do gradiente eletroquímico, é chamado passivo. O transporte ativo requer energia adicional e não pode ocorrer somente pela força cinética e elétrica.

Para constatar se determinado íon foi transportado ativa ou passivamente na célula, devem ser medidos tanto a concentração de íons na solução externa e dentro da célula como o potencial elétrico (E_m) entre a célula e o meio externo. Esta medida pode ser feita por microeletrodo. A diferença de potencial elétrico (E_{cal}) pode ser calculada



pela substituição do valor da concentração de íons na equação de Nernst. Ela designa o potencial medido, E_{cal} , e a diferença entre E_m e E_{cal} indica se ocorre transporte ativo ou passivo.

$$E_m - E_{cal} = E_d$$

onde: E_d = força de transporte.

Para cátions, o valor negativo de E_d indica absorção passiva e o positivo, absorção ativa. Para ânions é o contrário. O valor negativo indica transporte ativo e o positivo, transporte passivo.

Deve ser lembrado que um teste desta natureza só é válido se forem mantidas as condições de equilíbrio do sistema. Isto é difícil de se conseguir em estudos da planta inteira, porque a parte aérea da planta forma um forte dreno para os íons absorvidos pelas raízes.

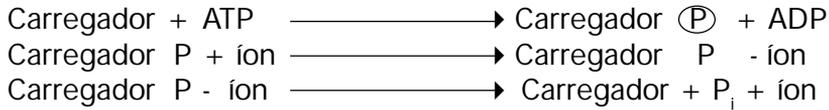
Teoria dos carregadores

Foi elaborada uma hipótese de que as membranas biológicas contêm moléculas com capacidade de carregar íons através de membranas (Epstein & Hagan, 1952). Essas moléculas são chamadas "carregadores". Os carregadores possuem sítio específico para cada íon e, desta maneira, funcionam como transportadores seletivos de íons através da membrana. Direta ou indiretamente, a geração destes carregadores requer ATP. Admite-se que este carregador seja difusivo através da membrana. Na superfície externa da membrana ele encontra o íon específico com o qual tem afinidade. O íon é, então, associado ao carregador formando um complexo íon-carregador. Esse complexo atravessa a membrana e chega até uma fosfatase, localizada na superfície interna da membrana, isto é, dentro do citoplasma (Mengel et al., 2001).

A regeneração da atividade seletiva do carregador necessita trifosfato de adenosina (ATP). Esse processo é completado pelo ATP "cinase-carregador", que também se localiza na superfície interna da membrana. O complexo carregador fosforilado pode, então, difundir-se outra vez para a superfície externa, apanhar outro íon e, desta maneira, repetir o ciclo. O ATP necessário para o processo pode ser gerado da respiração das raízes, da fotofosforilação e dentro de organismos anaeróbios da glicólise.

O ciclo completo da absorção pode ser representado pelas seguintes equações (Mengel et al., 2001):



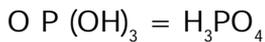
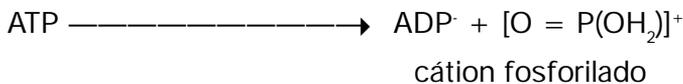


A absorção de íons necessita energia e é seletiva. O ATP é fornecedor desta energia, e o transporte é contra o gradiente de concentração.

ATPase: hipótese de transporte

ATPase é um grupo de enzimas que tem a capacidade de dissociar ATP em ADP e fosfato inorgânico. A energia liberada por esse processo pode ser utilizada no transporte de íons através da membrana. Nas plantas, o fenômeno é conhecido como atividade de ATP, que é associado com o plasmalema e ativado por cátions (Hodges, 1973). Foi observada alta correlação entre a atividade de ATPase e a absorção de íons (Fisher et al., 1970).

Outra indicação sobre a importância da atividade da ATPase, em processo de absorção de íons, foi relatada por Hodges (1973). Baseando-se nestas descobertas, este pesquisador propôs um modelo hipotético para a absorção de cátions e ânions. A ATPase, associada com a membrana, dissocia ATP em ADP⁻ (ânion) e cátion fosforilado, que não é estável, mas reage rapidamente com água e gera H⁺, como explicado pela seguinte equação (Mengel et al., 2001):



A reação líquida da ATPase resulta na produção de um ânion ADP⁻ e de um cátion H⁺ que, liberado para o meio externo, origina um gradiente de pH através da membrana. O ânion equivalente permanece no



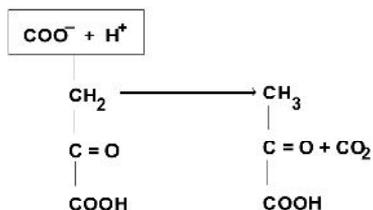
citoplasma e dá origem a um eletropotencial negativo na célula em comparação com o meio externo. Esta diferença foi observada na célula viva, sendo da ordem de aproximadamente 60 a 160 mV (Mengel et al., 2001).

Como a célula está com carga negativa, atrai cátions em troca de H^+ . Se a membrana não está completamente impermeável, transporta os cátions que se difundem através da membrana para o citoplasma. Este tipo de difusão de íons é chamado eletrose.

Neste modelo, admite-se também que a produção de ADP^- pela dissociação de ATP e, conseqüentemente, a liberação no citoplasma, aumenta a concentração de OH^- . Este é o resultado da reação de ADP^- com H_2O :



Hodges (1973) sugeriu que este OH^- pode promover o carregador de ânion e, dessa maneira, ocorrer absorção seletiva de ânion em troca de OH^- . Nesta reação, o pH aumenta (consumo de íons H^+ e liberação de íons OH^-) e, conseqüentemente, ocorre o processo de descarboxilação (Mengel et al., 2001).



CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE ÍONS

Geralmente, a absorção de nutrientes pelas plantas refere-se à absorção de íons. Por esta razão, neste capítulo, a absorção de nutrientes será referida como absorção de íons (Fageria, 1984). Nos últimos 50 anos, muitos trabalhos foram realizados para entender o mecanismo de absorção de nutrientes pelas raízes das plantas. Embora tenha sido alcançado muito progresso, vários aspectos ainda não foram entendidos.



Epstein & Hagan (1952) introduziram um tratamento da cinética de absorção iônica em termos semelhantes à enzimologia. Eles propuseram uma cinética de absorção de íons semelhante à de Michaelis-Menten (Barber, 1984). De acordo com esta hipótese, a absorção de íons, em função da concentração externa, é simplesmente uma curva hiperbólica (Fig. 11.8). A taxa de absorção de íons desta curva pode ser explicada, utilizando-se a equação da cinética de Michaelis-Menten (Barber, 1984).

$$V = \frac{V_{\max} (C)}{K_m + (C)}$$

onde: **V** = taxa de absorção de íon; **V_{mx}** = absorção máxima; **C** = concentração de íon (solução externa); e **K_m** = constante de Michaelis-Menten.

Claassen & Barber (1974) observaram que existe um nível de "C" para o qual "I" é nulo. Por isso, para descrever a curva, faz-se necessário um terceiro parâmetro, **C_{min}**, que é a concentração na qual **I_{mx}**, fluxo líquido, é nulo. A equação, então, conforme Barber (1984), torna-se:

$$I_{\max} = \frac{I_{\max} (C - C_{\min})}{K_m + C - C_{\min}}$$

Fageria (1976) e Hai & Laudelout (1966) propuseram a técnica do fluxo contínuo para obter a cinética de absorção. A técnica do fluxo contínuo assegura uma ótima absorção de íons a uma concentração muito baixa, através da manutenção da concentração constante do íon próximo da superfície das raízes. Na técnica do fluxo contínuo, a taxa de absorção (U) é igual ao produto da taxa de fluxo (F, mL h⁻¹) pela diferença entre a concentração (mg kg⁻¹) da solução que entra (C_o) e a da solução que sai (C_s) do sistema radicular da planta.

$$U = F \cdot (C_o - C_s)$$



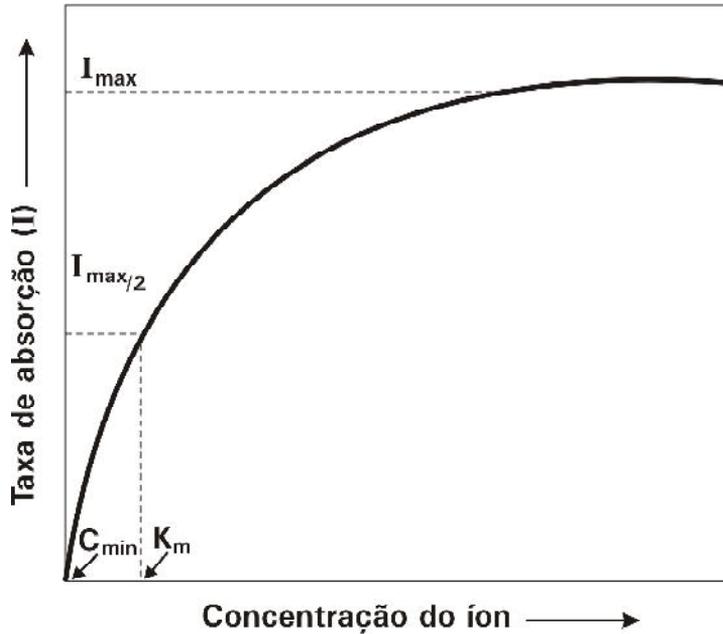


Fig. 11.8. Relação entre a concentração do íon e a sua taxa de absorção.

Fonte: Adaptada de Fageria et al. (1997).

A taxa de absorção (V , $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$), com base na massa da raiz, pode ser calculada pela seguinte equação (Fageria, 1976):

$$\text{Taxa de absorção (V)} = \frac{\left[1 - \frac{C_s \cdot F \cdot C_o}{C_o} \right]}{\text{Massa da raiz}}$$

A taxa de absorção de nutrientes durante todo o ciclo da cultura pode ser calculada mediante a análise da planta, usando-se a seguinte fórmula:

$$I_m = \frac{(\log_e WR_2 - \log_e WR_1) (M_2 - M_1)}{(t_2 - t_1) (WR_2 - WR_1)}$$

onde: I_m = taxa de absorção do nutriente; WR_1 = massa seca inicial das raízes; WR_2 = massa seca final das raízes; M_1 = quantidade total inicial do nutriente acumulado; M_2 = quantidade total final do nutriente acumulado; e $(t_2 - t_1)$ = intervalo de tempo decorrido.

A taxa de absorção relativa de cátions pelas raízes da planta, segundo Yoshida (1981), ocorre na ordem $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, e os ânions na ordem $\text{NO}_3^- > \text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$.



Ainda de acordo com Yoshida (1981), quando os íons NH_4^+ e NO_3^- estão disponíveis no meio de crescimento, a planta de arroz prefere NH_4^+ e, por esta razão, o pH pode diminuir. Posteriormente, quando absorve NO_3^- , o pH aumenta.

EXIGÊNCIA NUTRICIONAL

Para manter a fertilidade de um determinado solo em níveis adequados, é necessário conhecer a exigência nutricional da cultura em questão. A exigência nutricional do arroz é determinada por vários fatores, tais como, condições climáticas, tipo de solo, cultivar, produtividade esperada e práticas culturais adotadas. Encontra-se na Tabela 11.3 o acúmulo de nutrientes pela cultura do arroz de terras altas em solo de Cerrados, que obedece à seguinte ordem: $\text{N} > \text{K} > \text{P} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$. Para produzir uma tonelada de grãos de arroz de terras altas, é necessário que, na época da colheita, tenham sido acumuladas na parte aérea da planta, as seguintes quantidades de nutrientes: 47 kg de N; 34 kg de K; 7,5 kg de P; 5,5 kg de Ca; 4,5 kg de Mg; 1.043 g de Fe; 377 g de Mn; 96 g de Zn; e 23 g de Cu.

Na cultura de arroz irrigado, o acúmulo de nutrientes ocorre na seguinte ordem: $\text{K} \geq \text{N} > \text{P} > \text{Mg} \geq \text{Ca} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{B}$ (Fig. 11.9). O acúmulo linear de quase todos os nutrientes está relacionado com a massa seca da parte aérea e dos grãos (Fig. 11.10). A produção de uma tonelada de grãos de arroz irrigado, corresponde ao acúmulo, na parte aérea da planta na época da colheita, de, aproximadamente: 23 kg de K; 22,5 kg de N; 5 kg de P; 4,6 kg de Mg; 4 kg de Ca; 962 g de Mn; 381 g de Fe; 85 g de Zn; 30 g de Cu; e 9 g de B.



Tabela 11.3. Produtividade e acúmulo de nutrientes pela cultura do arroz de terras altas, sob diferentes níveis de fertilidade do solo.

Fertilidade do solo	Produtividade (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	Mn	Fe
Baixa	2.110b	20c	4b	53b	7d	5b	97b	16a	445b	1517a
Média	2.992a	28b	7a	72e	10ab	7ab	152a	20a	639ab	1454a
Alta	3.494a	35a	7a	77e	14a	9a	178a	20a	814a	2052a
Média + Adubo verde	3.524	26	10	67	11	7	176	15	914	3109
Teste F(cult)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Teste F(T)	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	ns
Teste F(Cult x T)	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Folhas e colmos										
Baixa	1.694b	51b	5a	3e	0.69	1.86	38b	26a	54b	120a
Média	2.117a	88a	7a	4a	0.83	2.36	46ab	31a	72a	137a
Alta	2.104a	106a	7a	4a	0.84	2.40	46.ab	32a	78a	119a
Média + Adubo verde	2.403	39	15	5	0.96	2.79	63	31	113	142
Teste F(Cult)	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Teste F(T)	**	**	ns	ns	ns	**	**	ns	**	ns
Teste F(Cult x T)	ns	**	**	**	ns	ns	**	ns	ns	ns
Grãos										

* , ** , ns = significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, no nível de 5% de probabilidade. Os valores referem-se à média de três cultivos. No tratamento fertilidade média + adubo verde, os dados referem-se a apenas um cultivo.

Fonte: Fageria & Souza (1995).



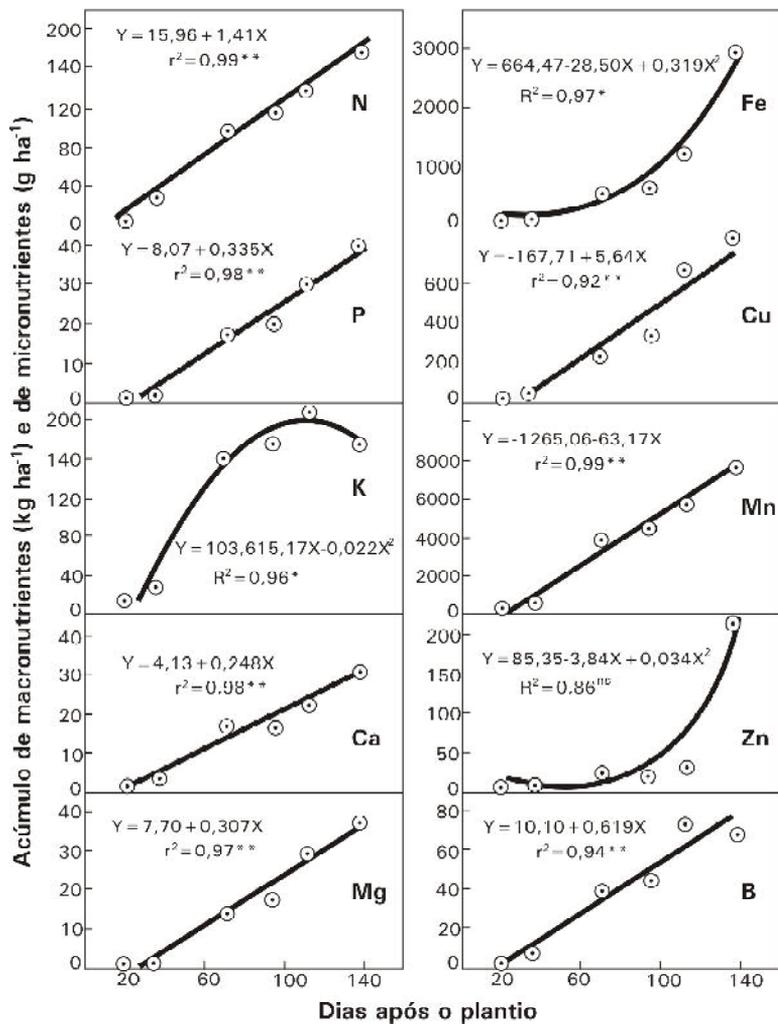


Fig. 11.9. Acúmulo de nutrientes pela cultura do arroz irrigado durante o período de crescimento.
 Fonte: Adaptada de Fageria (1998).



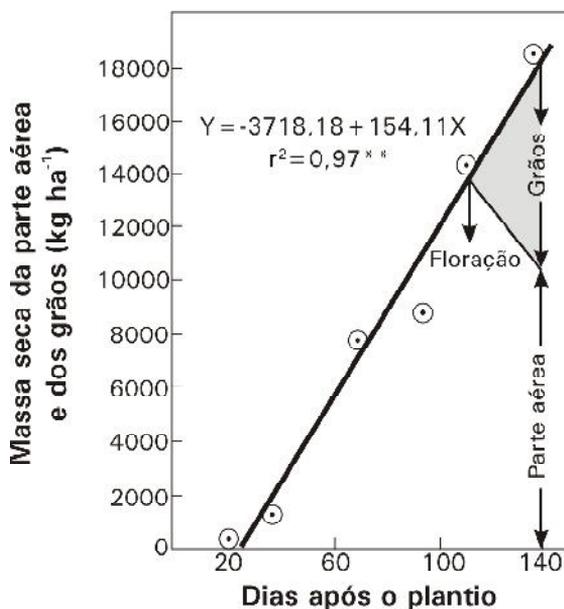


Fig. 11.10. Massa seca da parte aérea durante o período de crescimento e produtividade da cultura do arroz irrigado.

Fonte: Adaptada de Fageria (1998).

DISTRIBUIÇÃO NAS DIFERENTES PARTES DA PLANTA

Fageria (1991) verificou em trabalho realizado em casa de vegetação, que a distribuição de nitrogênio na planta de arroz foi de aproximadamente 15% nas raízes, 35% na parte aérea e 50% nos grãos. A distribuição de fósforo foi de 10% nas raízes, 25% na parte aérea e 65% nos grãos. Com relação ao potássio, a distribuição ocorreu de forma inversa, sendo 81% translocado para a parte aérea, ficando aproximadamente 3% nas raízes e o restante (16%) nos grãos. Portanto, a maior parte do nitrogênio e do fósforo foi transportada para os grãos, e a maior quantidade de potássio, para o restante da parte aérea. A distribuição de vários nutrientes na parte aérea do arroz de terras altas e de várzeas, em condições de campo, sob vários níveis de fertilidade do solo, é apresentada nas Tabelas 11.3 e 11.4.

DIAGNÓSTICO DAS DEFICIÊNCIAS NUTRICIONAIS

A deficiência nutricional pode ser identificada por sintomas visuais, pela análise química do solo e pela análise química da planta. O primeiro é um método qualitativo e, dentre os três, é o de menor custo. A identificação de deficiências nutricionais requer, no entanto, grande experiência por parte do avaliador, pois podem ser facilmente confundidas com sintomas de doenças, pragas, deficiência hídrica ou de outros estresses ambientais. Os sintomas de deficiências nutricionais na cultura do arroz são discutidos



Tabela 11.4. Produtividade e acúmulo de nutrientes pela cultura do arroz irrigado, sob diferentes níveis de fertilidade em solo de várzea.

Fertilidade do solo	Produtividade (kg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	Mn	Fe
.....(kg ha ⁻¹).....										
Baixa	5.406c	29b	6b	169a	22b	9b	443a	22b	2728b	2952a
Média	7.987b	41ab	8ab	154a	24ab	11ab	413a	24b	3320b	3135a
Alta	10.726a	55a	11a	207a	36a	16a	642a	53a	4902a	3927a
Média + Adubo verde	6.879	41	7	144	24	9	334	26	3668	3533
Teste F(Cult)	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
Teste F(T)	ns	**	**	ns	*	*	ns	**	**	ns
Teste F(Cult x T)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
Folhas e colmos										
Baixa	4.307b	80a	19a	13a	1,91	4,38	177a	152a	218a	620b
Média	5.523a	56a	14a	14a	1,80	6,14	133a	125a	228a	908a
Alta	5.464a	61a	15a	13a	1,68	6,10	134a	140a	228a	884a
Média + Adubo verde	6.332	72	17	15	2,57	7,40	157	139	214	1054
Teste F(Cult)	**	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	**
Teste F(T)	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**
Teste F(Cult x T)	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
Grãos										
Baixa	4.307b	80a	19a	13a	1,91	4,38	177a	152a	218a	620b
Média	5.523a	56a	14a	14a	1,80	6,14	133a	125a	228a	908a
Alta	5.464a	61a	15a	13a	1,68	6,10	134a	140a	228a	884a
Média + Adubo verde	6.332	72	17	15	2,57	7,40	157	139	214	1054
Teste F(Cult)	**	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	**
Teste F(T)	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**
Teste F(Cult x T)	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns

*, **, ns = significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, no nível de 5% de probabilidade.

Os valores referem-se à média de três cultivos. No tratamento fertilidade média + adubo verde, os dados referem-se a apenas dois anos.

Fonte: Fageria et al. (1995).

abaixo e também foram descritos, incluindo ilustrações em cores, por Fageria (1984), Barbosa Filho (1987) e Fageria & Barbosa Filho (1994).

Sintomas visuais

Sintomas visuais é um dos métodos mais barato para detectar deficiências nutricionais nas plantas. Para a identificação de deficiência nutricional por meio de sintomas visuais é importante adotar um método sistemático de observação dos principais componentes da planta, como altura, perfilhamento, cor das folhas e desenvolvimento do sistema radicular. Com o objetivo de auxiliar os técnicos e agricultores na identificação de problemas nutricionais da cultura do arroz, são feitas, neste trabalho, descrições dos sintomas visuais acompanhados de fotografias.

Nitrogênio

A deficiência de nitrogênio na cultura é causada por perda deste nutriente no sistema solo-planta por lixiviação, volatilização, erosão do solo, desnitrificação e baixo teor de matéria orgânica no solo. Os sintomas de deficiência de nitrogênio são caracterizados por amarelecimento nas folhas mais velhas que, dependendo da intensidade e da evolução da deficiência, pode atingir toda a planta (Fig. 11.11). A lâmina da folha mais baixa morre, ficando o tecido com coloração marrom-chocolate. A deficiência de N na planta do arroz diminui o perfilhamento e, conseqüentemente, o número de panículas (Fig. 11.12).

Foto: Embrapa Arroz e Feijão



Fig. 11.11. Planta de arroz na fase vegetativa sem e com a aplicação de nitrogênio.



Foto: Embrapa Arroz e Feijão

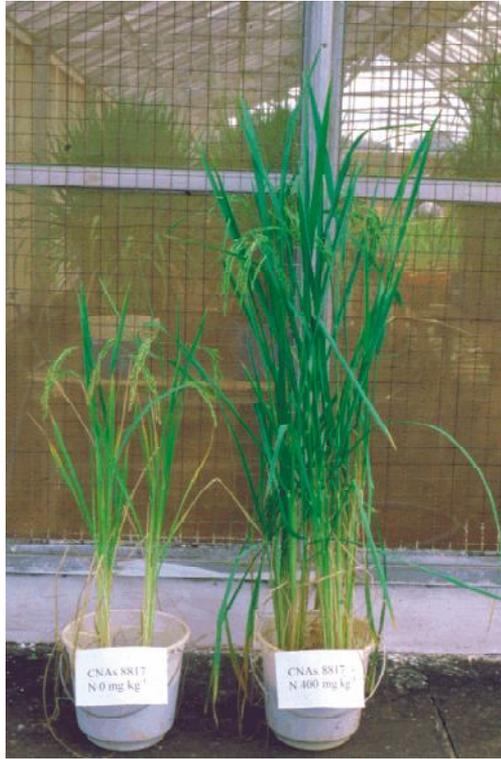


Fig. 11.12. Planta de arroz na fase de maturação sem e com a aplicação de nitrogênio.

Fósforo

O fósforo, como no caso do nitrogênio, é também um elemento móvel na planta, e a deficiência aparece primeiramente nas folhas velhas. A deficiência de fósforo reduz o perfilhamento (Fig. 11.13) e prolonga a maturação dos grãos. 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. O fósforo promove o desenvolvimento do sistema radicular que está ligado com a absorção de água e nutrientes.





Fig. 11.13. Planta de arroz com baixa (0 mg kg^{-1} de solo), média (50 mg kg^{-1} de solo) e alta (250 mg kg^{-1} de solo) dose de fósforo.

Potássio

A deficiência de potássio na cultura de arroz não é tão comum como a de nitrogênio e a de fósforo. Entretanto, em solos muito arenosos, com baixa capacidade de retenção de potássio, poderá ocorrer deficiência desse elemento. A maior parte do potássio extraído pela cultura do arroz permanece na palhada. Em termos práticos, isto é importante à medida em que os restos culturais são incorporados ao solo.

A deficiência de potássio resulta na redução do crescimento da planta (Fig. 11.14). Os sintomas aparecem primeiro como clorose branca nas pontas das 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.

Cálcio

O cálcio é um nutriente imóvel na planta, portanto, os sintomas de deficiência aparecem nas folhas mais novas. As folhas terminais morrem conforme a deficiência se acentua, causando severo atrofiamento das plantas (Fig. 11.15). À medida que a deficiência persiste, as folhas mais velhas desenvolvem uma necrose marrom-avermelhada nas nervuras.



Foto: Embrapa Arroz e Feijão

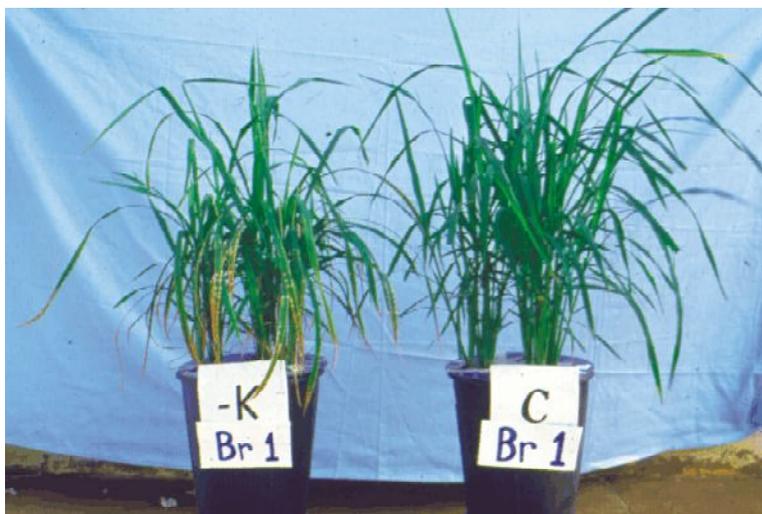


Fig. 11.14. Planta de arroz com e sem a deficiência de potássio.

Foto: Embrapa Arroz e Feijão



Fig. 11.15. Planta de arroz com deficiência de cálcio.



Magnésio

Inicia-se nas folhas mais velhas, com coloração amarelada e, mais tarde, entre as nervuras da folha torna-se alaranjada (Fig. 11.16). Quando a deficiência se espalha por toda a folha, esta fica completamente seca.

Foto: Embrapa Arroz e Feijão



Fig. 11.16. Planta de arroz com deficiência de magnésio.

Enxofre

Os sintomas de deficiência de enxofre assemelham-se aos da de nitrogênio. A diferença básica é que a deficiência de enxofre começa nas folhas mais novas e a de nitrogênio nas folhas mais velhas. Inicialmente, as folhas com esta deficiência tornam-se amarelo-esverdeadas (Fig. 11.17). Com a intensificação da deficiência, quase todas as folhas ficam secas.



Foto: Embrapa Arroz e Feijão

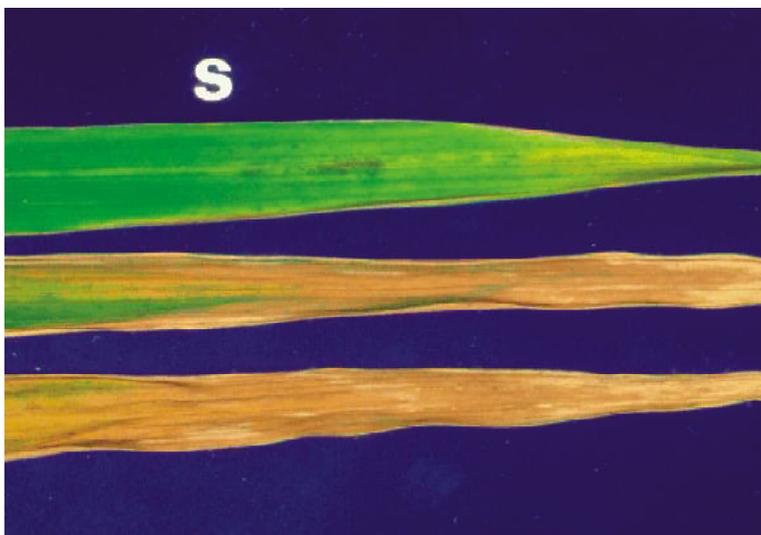


Fig. 11.17. Folhas de arroz com deficiência de enxofre.

Ferro

O primeiro sintoma de deficiência de ferro pode ser identificado por uma clorose internervural das folhas mais novas. Com o tempo, toda a planta torna-se amarelada em tom de palha (Fig. 11.18).

Foto: Embrapa Arroz e Feijão



Fig. 11.18. Plantas de arroz em fase inicial de crescimento com deficiência de ferro.



Zinco

O primeiro sintoma de deficiência de zinco observado em arroz é uma coloração verde esbranquiçada que se desenvolve no tecido, na base da folha de cada lado da nervura central. A lâmina da folha tem um alargamento proeminente na zona da clorose. À medida que a folha se torna mais velha, o tecido clorótico adquire coloração ferruginosa. As margens da folha, na área de coloração ferruginosa, são geralmente verdes.

As folhas mais novas, em desenvolvimento, têm tecido clorótico branco que, com a progressão da deficiência, tornam-se marrom-ferrugem. O crescimento da planta é atrofiado e as folhas, de cor ferrugem, tornam-se proeminentes em estádios posteriores (Fig. 11.19).

Foto: Embrapa Arroz e Feijão



Fig. 11.19. Planta de arroz com deficiência de zinco.

Cobre

As folhas mais novas apresentam coloração azul-esverdeada, tornando-se cloróticas junto às pontas. A clorose desenvolve-se para baixo, ao longo da nervura principal de ambos os lados, seguida de



necrose marrom-escuro das pontas. As folhas enrolam-se, mantendo a aparência de agulhas em toda a sua extensão ou, ocasionalmente, na metade da folha, com a base final desenvolvendo-se normalmente (Fig. 11.20).

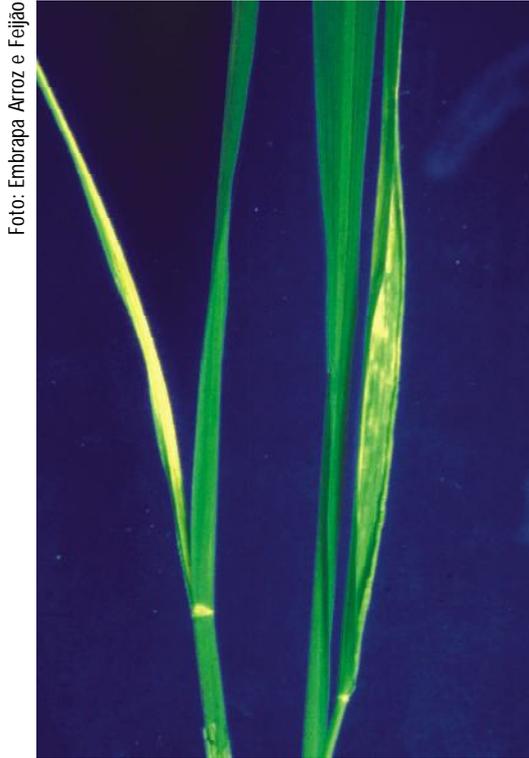


Fig. 11.20. Folhas de arroz com deficiência de cobre.

Boro

A deficiência de boro ocorre de forma localizada, nas folhas novas ou brotos. As pontas das folhas emergentes tornam-se brancas e dobram-se, como no caso de deficiência de cálcio. Em casos severos, os pontos em crescimento podem morrer (Fig. 11.21).

Molibdênio

Observa-se clorose internervural nas folhas mais novas (Fig. 11.22) com enrolamento da lâmina para cima com o avanço da deficiência.



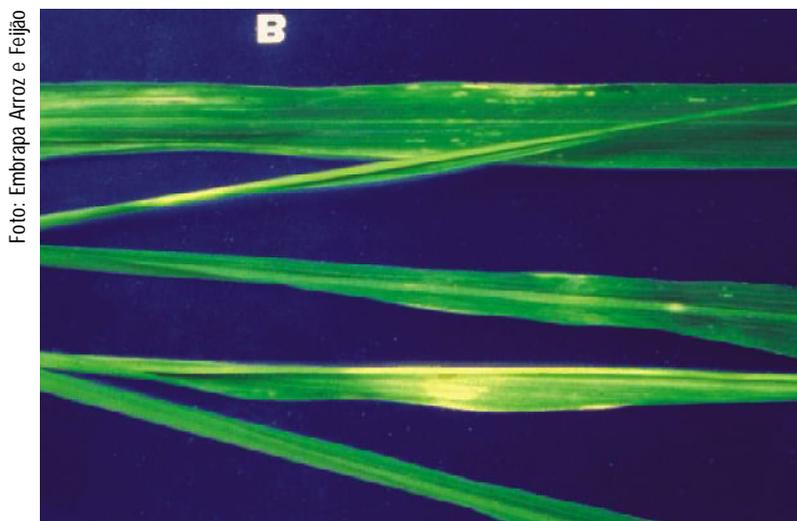


Fig. 11.21. Folhas de arroz com deficiência de boro.

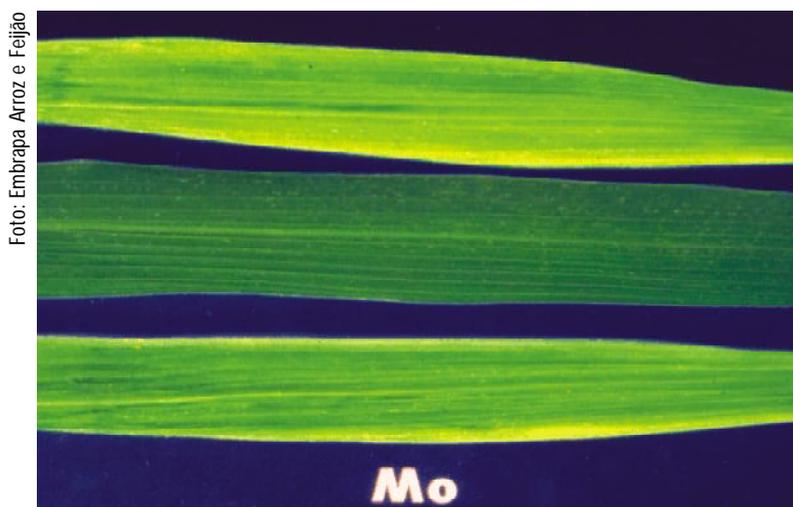


Fig. 11.22. Folhas de arroz com deficiência de molibdênio.

Análise da Planta

A análise da planta ou, mais especificamente, a análise química quantitativa de uma planta ou de parte dela fornece um valor integrado de todos os fatores que influenciam a sua composição no momento



da amostragem. A análise da planta, utilizada como guia para a identificação de problemas nutricionais ou de níveis de fertilidade do solo, deve ser considerada como um método relativo, ou seja, a interpretação dos resultados da análise necessita de um padrão de comparação para cada nutriente. Este valor padrão deve ser conhecido para cada cultura e em condições ambientais diferentes. Comparando-se o teor de um dado nutriente encontrado na planta com o seu nível crítico previamente estabelecido, é possível determinar o estado nutricional da planta em relação àquele nutriente. Plantas que apresentam o teor de um determinado nutriente acima do nível crítico são consideradas adequadamente supridas pelo nutriente em questão, enquanto as que apresentam teor abaixo do nível crítico são consideradas deficientes.

Na Fig. 11.23 podem ser vistas a relação entre o teor de um nutriente na planta, a produção relativa e o nível crítico. O nível crítico é influenciado por vários fatores, tais como: idade da planta; parte da planta analisada; cultivar; umidade do solo; temperatura; e presença de outros nutrientes. Estes fatores são discutidos detalhadamente em Fageria (1984). Os níveis deficiente, crítico, adequado e tóxico de vários elementos são apresentados na Tabela 11.5.

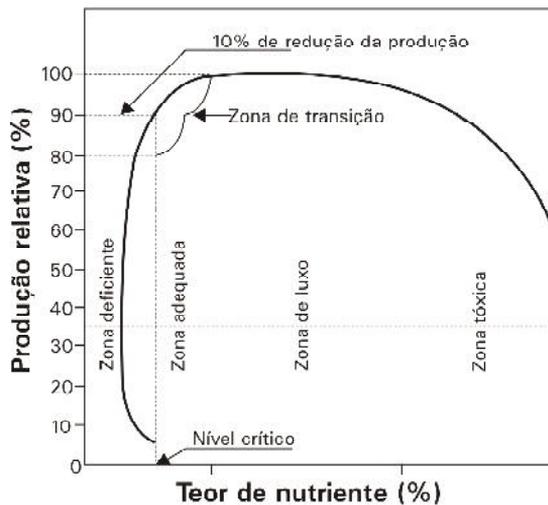


Fig. 11.23. Relação entre o teor de um nutriente na planta, a produção relativa e o nível crítico.

Fonte: Adaptada de Fageria (1989).



Tabela 11.5. Teores deficientes, críticos, adequados e tóxicos de vários elementos para a planta de arroz.

Elemento	Parte da planta analisada	Estádio de crescimento	Teor do nutriente			
			Deficiente	Crítico	Adequado	Tóxico
N	Folha	diferenciação da panícula	< 1,8%	1,8 - 2,6%	2,6 - 4,2%	-
P	Toda a parte superior	75 dias de idade	< 0,15%	0,15 - 0,25%	0,25-0,48%	> 0,8-1%
K	Toda a parte superior	75 dias de idade	< 1%	1,0 - 1,5%	1,5 - 4%	> 5%
Ca	Toda a parte superior	100 dias de idade	< 0,2%	0,2 - 0,25%	0,25-0,4%	> 0,65%
Mg	Toda a parte superior	100 dias de idade	< 0,12%	0,12 - 0,17%	0,17 - 0,3%	> 0,3%
S	Folha	perflhamento	< 0,1%	0,1 - 0,2%	0,2 - 0,6%	> 0,6%
Fe	Toda a parte superior	perflhamento	< 50 mg kg ⁻¹	50-70 mg kg ⁻¹	70-300 mg kg ⁻¹	< 300 mg kg ⁻¹
Zn	Toda a parte superior	perflhamento	< 10 mg kg ⁻¹	10-20 mg kg ⁻¹	20-150 mg kg ⁻¹	> 500 mg kg ⁻¹
Mn	Toda a parte superior	perflhamento	< 20 mg kg ⁻¹	20-30 mg kg ⁻¹	30-600 mg kg ⁻¹	> 1000 mg kg ⁻¹
B	Folha adulta superior	perflhamento	< 15 mg kg ⁻¹	15-20 mg kg ⁻¹	20-100 mg kg ⁻¹	> 200 mg kg ⁻¹
Cu	Folha adulta	perflhamento	< 4 mg kg ⁻¹	4-5 mg kg ⁻¹	5-20 mg kg ⁻¹	> 20 mg kg ⁻¹
Mo	Folha adulta	perflhamento	< 0,1 mg kg ⁻¹	0,1-0,5 mg kg ⁻¹	0,5-2 mg kg ⁻¹	-
Al	Toda a parte superior	-	-	-	-	> 300 mg kg ⁻¹

Fonte: Fageria(1984).



CORREÇÃO DAS DEFICIÊNCIAS NUTRICIONAIS

Após a identificação da deficiência, a etapa seguinte é a sua correção, o que pode ser feito pela aplicação de fertilizantes no solo ou por via foliar. Neste livro, as recomendações de adubação com N, P, K e micronutrientes são discutidas no Capítulo 12. A aplicação foliar é utilizada, geralmente, para a correção de deficiências de micronutrientes. Na Tabela 11.6 está indicada a quantidade de fertilizantes recomendada para aplicações no solo e por via foliar.

Tabela 11.6. Quantidade de micronutrientes para aplicações no solo e por via foliar.

Nutriente	Fertilizante, fórmula e teor do nutriente	Aplicação no solo (kg ha ⁻¹)	Aplicação foliar (kg/500 L de água)
Boro	Bórax Na ₂ B ₄ O ₇ - 10,6% B	10 - 15	1 - 2
Cobre	Sulfato de cobre CuSO ₄ .5H ₂ O - 26% Cu	20 - 25	1 - 2
Ferro	Sulfato ferroso FeSO ₄ .7H ₂ O - 20% Fe	-	8 - 10
Manganês	Sulfato de manganês MnSO ₄ .4H ₂ O - 27% Mn	15	1 - 2
Molibdênio	Molibdato de amônio (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂ .4H ₂ O - 54% Mo	0,5 - 1	0,25 - 0,5
Zinco	Sulfato de zinco ZnSO ₄ .7H ₂ O - 23% Zn	20 - 30	1 - 2,5

Fonte: Fageria (1984).

EFICIÊNCIA NUTRICIONAL

A eficiência nutricional refere-se à massa seca da parte aérea, ou de grãos, produzida por unidade de nutriente aplicado. De acordo com Fageria (1992) e Fageria & Baligar (2003), a eficiência nutricional pode ser expressa e calculada de cinco maneiras:

- **Eficiência Agronômica (EA):** é a produtividade econômica (grãos, no caso de culturas anuais) obtida por unidade de nutrientes aplicados:

Eficiência agronômica (EA) = $(PG_{cf} - PG_{sf})/QN_a$, dada em kg kg⁻¹, onde: PG_{cf} = produtividade de grãos com fertilizante, PG_{sf} = produtividade de grãos sem fertilizante e QN_a = quantidade de nutriente aplicado, todos expressos em kg ha⁻¹.



- **Eficiência Fisiológica (EF):** é a produtividade biológica (grãos e palha, em culturas anuais) obtida por unidade de nutrientes acumulados:

Eficiência fisiológica (EF) = $(PTB_{cf} - PTB_{sf}) / (AN_{cf} - AN_{sf})$, dada em $kg\ kg^{-1}$, onde: PTB_{cf} = produtividade total biológica (parte aérea e grãos) com fertilizante; PTB_{sf} = produtividade total biológica sem fertilizante; AN_{cf} = acumulação de nutriente com fertilizante e AN_{sf} = acumulação de nutriente sem fertilizante, todos expressos em $kg\ ha^{-1}$.

- **Eficiência de Recuperação (ER):** é a quantidade de nutrientes acumulados por unidade de nutrientes aplicados:

Eficiência de recuperação (ER) = $(AN_{cf} - AN_{sf}) / (QN_a) \times 100$, dada em percentagem, onde: AN_{cf} = acumulação de nutriente com fertilizante, AN_{sf} = acumulação de nutriente sem fertilizante e QN_a = quantidade de nutriente aplicado, todos expressos em $kg\ ha^{-1}$.

- **Eficiência Agrofisiológica (EAF):** é a produtividade de grãos obtida por unidade de nutrientes acumulados:

Eficiência agrofisiológica (EAF) = $(PG_{cf} - PG_{sf}) / (AN_{cf} - AN_{sf})$, dada em $kg\ kg^{-1}$, onde: PG_{cf} = produção de grãos com fertilizante, PG_{sf} = produtividade de grãos sem fertilizante, AN_{cf} = acumulação de nutriente com fertilizante e AN_{sf} = acumulação de nutriente sem fertilizante, todos expressos em $kg\ ha^{-1}$.

- **Eficiência de Utilização (EU):** é o produto da eficiência fisiológica pela eficiência de recuperação:

$EU = \text{Eficiência fisiológica} \times \text{Eficiência de recuperação}$, dada em $kg\ kg^{-1}$.

Na Tabela 11.7 são apresentados os cinco tipos de eficiência citados para N, P e K para diferentes genótipos de arroz irrigado, em solo de várzea. As eficiências variam de acordo com os genótipos.

Otimização da eficiência nutricional

A otimização da eficiência nutricional é fundamental para aumentar a produtividade e reduzir o custo de produção (Baligar et al., 2001; Fageria & Baligar, 2001). Para tanto, deve ser levado em consideração o manejo integrado de nutrientes (MIN), que pode ser definido como “pacote de práticas que manipulam o meio de crescimento da planta para suprimento de nutrientes essenciais na quantidade e nas proporções adequadas para se obter produtividade ótima sem a degradação do solo” (Fageria, 2001). Um modelo de sistema integrado de nutrientes é apresentado na Fig. 11.24.



Tabela 11.7. Eficiência de uso de N, P e K por diferentes genótipos de arroz irrigado em solo de várzea.

Genótipo	N		P		K	
	FM ⁽¹⁾	FA ⁽¹⁾	FM	FA	FM	FA
Eficiência Agronômica (kg kg⁻¹)						
Aliança	48	43	93	99	76	87
CNA 5751	42	46	79	105	64	92
CNA 6804	35	37	67	85	54	75
CNA 7238	51	46	98	105	80	92
CNA 7268	28	37	54	85	44	75
Metica 1	50	51	95	117	78	102
\bar{x}	42	43	81	99	66	87
Eficiência Fisiológica (kg kg⁻¹)						
Aliança	158	121	360	324	89	97
CNA 5751	141	106	533	355	119	122
CNA 6804	261	124	363	418	89	89
CNA 7238	149	110	407	364	100	109
CNA 7268	114	112	484	407	101	101
Metica 1	130	113	491	458	89	121
\bar{x}	159	114	440	388	98	107
Eficiência de Recuperação (%)						
Aliança	71	63	51	52	81	92
CNA 5751	70	63	33	40	58	59
CNA 6804	30	56	33	38	51	90
CNA 7238	32	77	45	51	75	88
CNA 7268	83	75	38	46	73	91
Metica 1	61	99	30	52	61	99
\bar{x}	65	72	38	47	67	87
Eficiência Agrofisiológica (kg kg⁻¹)						
Aliança	69	61	158	162	39	49
CNA 5751	60	80	226	227	51	78
CNA 6804	167	61	234	216	58	45
CNA 7238	68	61	187	200	48	60
CNA 7268	33	47	127	167	26	42
Metica 1	73	51	252	207	37	54
\bar{x}	78	60	197	109	43	55
Eficiência de Utilização (kg kg⁻¹)						
Aliança	104	77	183	167	72	85
CNA 5751	98	65	172	143	68	73
CNA 6804	65	70	115	153	45	79
CNA 7238	106	84	185	182	74	93
CNA 7268	94	81	181	177	72	91
Metica 1	81	108	140	236	56	120
\bar{x}	91	81	163	176	65	90

⁽¹⁾ FM = fertilidade média; FA = fertilidade alta.

Fonte: Baligar & Fageria (1997).



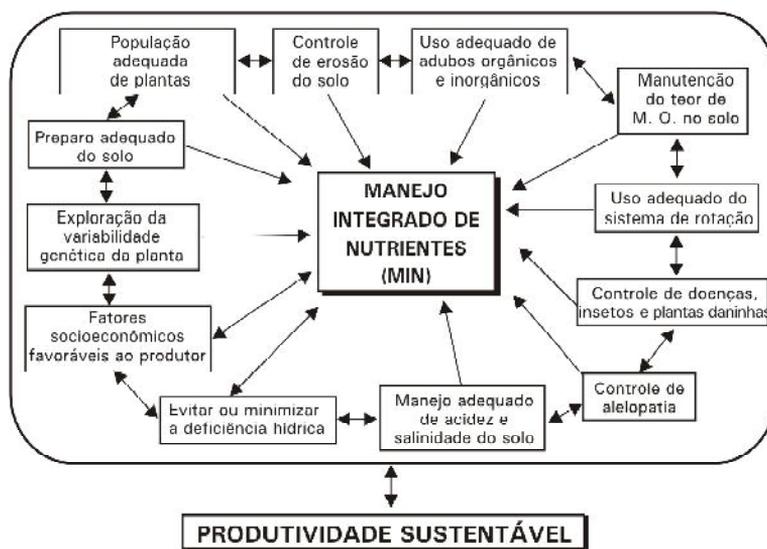


Fig. 11.24. Modelo de manejo integrado de nutrientes para produtividade sustentável.

Fonte: Adaptada de Fageria & Baligar (1997b).

REFERÊNCIAS

- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E.; FAGERIA, N. K.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Campinas: Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 75-95.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; He, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 7/8, p. 921-950, 2001.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**. New York: J. Wiley, 1984. 398 p.
- BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz: sequeiro e irrigado**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. 129 p. (POTAFOS. Boletim Técnico, 9).
- CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 54, n. 4, p. 564-568, Oct. 1974.
- DAINTY, J. Ion transport and electrical potentials in plant cells. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 13, p. 379-402, 1962.
- EPSTEIN, E.; HAGAN, C. E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 27, p. 457-474, 1952.
- FAGERIA, N. K. Effect of P, Ca and Mg concentrations in solution culture on growth and uptake of these ions by rice. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 5, p. 726-732, Sept./Oct. 1976.



- FAGERIA, N. K. **Adubação e nutrição mineral da cultura de arroz**. Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984. 341 p.
- FAGERIA, N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília, DF: EMBRAPA-DPU, 1989. 425 p. (EMBRAPA-CNPAP Documentos, 18).
- FAGERIA, N. K. Resposta de cultivares de arroz a fertilizante fosfatado em Latossolo Vermelho-Escuro do Brasil Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 1, p. 63-67, jan./abr. 1991.
- FAGERIA, N. K. **Maximizing crop yield**. New York: Marcel Dekker, 1992. 274 p.
- FAGERIA, N. K. **Estudos de calagem e adubação do arroz e do feijoeiro na região dos cerrados**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1998. 69 p. (EMBRAPA. Programa 04 – Sistemas de Produção de Grãos. Subprojeto 04.094.072-01). Relatório final.
- FAGERIA, N. K. Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 15/16, p. 2603-2629, 2001.
- 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, n. 10, p. 1279-1289, 1997a.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Integrated plant nutrient management for sustainable crop production: an overview. **International Journal of Tropical Agriculture**, Haryana, v. 15, n. 1-4, p. 1-8, 1997b.
- 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, n. 7/8, p. 1303-1319, 2001.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Methodology for evaluation of lowland rice genotypes for nitrogen use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 26, n. 6, p. 1315-1333, June 2003.
- FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. **Deficiências nutricionais na cultura de arroz**: identificação e correção. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. 36 p. (EMBRAPA-CNPAP Documentos, 42).
- FAGERIA, N. K.; SOUZA, N. P. de. Resposta das culturas de arroz e feijão em sucessão à adubação em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 3, p. 359-368, mar. 1995.
- FAGERIA, N. K.; FERREIRA, E.; PRABHU, A. S.; BARBOSA FILHO, M. P.; FILIPPI, M. C. **Seja o doutor do seu arroz**. Piracicaba: POTAFOS, 1995. 20 p. (POTAFOS. Arquivo do Agrônomo, 9).
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1997. 624 p.
- 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.; 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, 2003.



FISHER, J. D.; HANSEN, D.; HODGES, T. K. Correlation between ion fluxes and ion-stimulated adenosine triphosphatase activity of plant roots. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 46, p. 812-814, 1970.

GLASS, A. D. M. **Plant nutrition**: an introduction to current concepts. Boston: Jones and Bartlett, 1989. 1v.

HAI, T. V.; LAUDELOUT, H. Phosphate uptake by intact rice plants by the continuous flow method at low phosphate concentrations. **Soil Science**, Baltimore, v. 101, p. 408-417, 1966.

HODGES, T. K. Ion absorption by plant roots. **Advances in Agronomy**, New York, v. 25, p. 163-207, 1973.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic Press, 1986. 674 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A.; KOSEGARTEN, H.; APPEL, T. **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Dordrecht: Kluwer, 2001. 849 p.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981. 269 p.

