

**,CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
“LATO SENSU” (ESPECIALIZAÇÃO) A DISTÂNCIA  
SOLOS E MEIO AMBIENTE**

**NUTRIÇÃO MINERAL  
DE PLANTAS**

**Valdemar Faquin**

**Universidade Federal de Lavras - UFLA  
Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão - FAEPE  
Lavras – MG**

PARCERIA

Universidade Federal de Lavras - UFLA  
Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão - FAEPE

REITOR

Antônio Nazareno G. Mendes

VICE-REITOR

Ricardo Pereira Reis

DIRETOR DA EDITORA

Marco Antônio Rezende Alvarenga

PRÓ-REITOR DE PÓS-GRADUAÇÃO

Marcelo Silva de Oliveira

PRÓ REITOR ADJUNTO DE PÓS-GRADUAÇÃO “LATO SENSU”

Joel Augusto Muniz

COORDENADOR DO CURSO

José Maria de Lima

PRESIDENTE DO CONSELHO DELIBERATIVO DA FAEPE

Edson Ampélio Pozza

EDITORAÇÃO

Centro de Editoração/FAEPE

IMPRESSÃO

Gráfica Universitária/UFLA

**Ficha Catalográfica preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
da Biblioteca Central da UFLA**

Faquin, Valdemar

Nutrição Mineral de Plantas / Valdemar Faquin. -- Lavras: UFLA / FAEPE, 2005.  
p.: il. - Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a Distância: Solos e  
Meio Ambiente.

Bibliografia.

1. Planta. 2. Nutrição Mineral. 3. Exigência nutricional. 4. Solo. 5. Fertilidade. 6.  
Produção Agrícola. 7. Qualidade. I. Faquin V. II. Universidade Federal de Lavras. III.  
Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. IV. Título.

CDD – 581.1335  
– 631.81

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida,  
por qualquer meio, sem a prévia autorização.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
1.1 COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA PLANTA.....	5
1.2 SISTEMA SOLO-PLANTA .....	6
1.3 OS ELEMENTOS ESSENCIAIS .....	7
1.4 REAÇÕES ENTRE NUTRIÇÃO MINERAL, FERTILIDADE DO SOLO E ADUBAÇÃO.....	9
<b>2 ABSORÇÃO, TRANSPORTE E REDISTRIBUIÇÃO.....</b>	<b>13</b>
2.1 ABSORÇÃO IÔNICA RADICULAR .....	13
2.1.1 Introdução .....	13
2.1.2 O Contato do Íon com a raiz.....	15
2.1.3 Mecanismos de absorção.....	16
2.1.4 Cinética da absorção iônica .....	24
2.1.5 Papel do cálcio .....	36
2.1.6 Fatores que afetam a absorção iônica radicular.....	37
2.2 ABSORÇÃO IÔNICA FOLIAR.....	49
2.2.4 Velocidade de absorção e mobilidade dos nutrientes na floema.....	55
2.2.5 Fatores que afetam a absorção foliar.....	56
2.3 TRANSPORTE E REDISTRIBUIÇÃO .....	69
<b>3 EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS E FUNÇÕES DOS NUTRIENTES .....</b>	<b>73</b>
3.1 EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS.....	73
3.2 FUNÇÕES DOS NUTRIENTES .....	80
<b>4 ELEMENTOS ÚTEIS E ELEMENTOS TÓXICOS.....</b>	<b>140</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	140
4.2 ELEMENTOS ÚTEIS .....	140
4.2.1 Sódio.....	140
4.2.2 Silício.....	142
4.3 ELEMENTOS TÓXICOS .....	143

---

---

4.3.1 Alumínio .....	146
4.3.2 Cádmio.....	148
4.3.3 Chumbo.....	148
4.3.4 Bromo.....	150
4.3.5 Iodo .....	150
4.3.6 Flúor .....	151
4.3.7 Selênio .....	151
4.3.8 Cromo .....	152
<b>5 NUTRIÇÃO MINERAL E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS .....</b>	<b>153</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	153
5.2 EFEITO DOS NUTRIENTES NA QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS .....	157
5.2.1 Efeito sobre tubérculos, raízes e produtoras de açúcar .....	157
5.2.2 Efeito sobre produtoras de grãos (cereais e oleaginosas) .....	159
5.2.3 Efeito sobre as hortaliças e frutas .....	165
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	173
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>175</b>

---

**1.1 COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DA PLANTA**

A análise elementar da matéria seca da planta mostra que cerca de 90% do total de elementos corresponde ao C, O e H; o restante, aos minerais. Este fato é bem ilustrado na Tabela 1.1, para a cultura da soja.

**TABELA 1.1 Composição elementar de uma cultura de soja (31 de grãos e 51 de restos, matéria seca)**

Elemento	Kg/há	Elemento	g/ha
Carbono (C)	3.500	Boro (B)	100
Hidrogênio	450	Cloro (Cl)	10.000
Oxigênio (O)	3.300	Cobre (Cu)	100
Nitrogênio (N)	320	Ferro (Fe)	1.700
Fósforo (P)	30	Manganês (Mn)	600
Potássio (K)	110	Molibdênio (Mo)	10
Cálcio (Ca)	80	Zinco (Zn)	200
Magnésio (Mg)	35	Cobalto (Co)	5
Enxofre (S)	2	-	-
Outros (*)	138	-	-

(\*) Alumínio (Al), Silício (Si), Sódio (Na), etc.

Fonte: MALAVOLTA (1980).

São três os meios que contribuem com elementos químicos para a composição das plantas:

ar – C (como CO<sub>2</sub>)

água – H e O

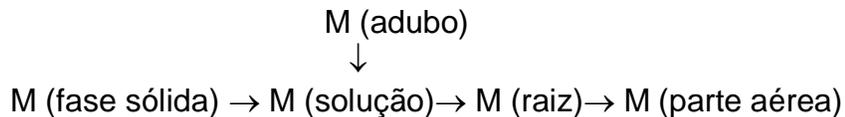
solo – os demais = elementos minerais, aqui simbolizados como M.

Do ponto de vista quantitativo, o solo é o meio menos importante no fornecimento de elementos às plantas; entretanto, é o mais facilmente modificável (torná-lo produtivo) pelo homem, tanto no aspecto físico (aração, gradagem, drenagem) quanto no químico (calagem e adubação). E a calagem e a adubação são a maneira mais rápida, mais barata e maior de que se dispõe para aumentar a produção de alimentos, fibras e energia. Como o homem come planta ou planta transformada e a planta tem que se alimentar, somente alimentando a planta adequadamente é possível alimentar o homem e ainda fornecer-lhe energia alternativa e a vestimenta que necessita. E isto justifica por que estudar Nutrição Mineral de Plantas.

Portanto, o estudo da Nutrição Mineral de Plantas tem muita relação com o da Fertilidade do Solo e com o da Fertilidade do Solo com o de Adubos e Adubação.

## 1.2 SISTEMA SOLO-PLANTA

Como visto, o solo é o meio que atua como reservatório de minerais necessários às plantas. O esquema abaixo é uma visão geral de compartimentos e vias de comunicação ou de transferência de um elemento (M), geralmente um nutriente de planta. O sistema é aberto em que os M são constantemente removidos de um lado, a uma fase sólida (reservatório) e acumulados no outro, a planta:



FASE SÓLIDA = RESERVATÓRIO

= matéria orgânica + fração mineral

Solução = compartimento para a absorção radicular

### Reações de transferência:

fase sólida  $\longrightarrow$  solução = disponibilidade  
 dessorção  
 mineralização da matéria orgânica

solução  $\longrightarrow$  fase sólida = adsorção  
 fixação  
 imobilização

solução  $\longrightarrow$  raiz = absorção  
 raiz  $\longrightarrow$  solução = troca, excreção, vazamento  
 raiz  $\longrightarrow$  parte aérea = transporte a longa distância  
 parte aérea  $\longrightarrow$  raiz = redistribuição

A solução do solo é o compartimento de onde a raiz retira ou absorve os elementos essenciais. Quando a fase sólida (matéria orgânica + minerais) não consegue transferir para a solução do solo quantidades adequadas de um nutriente qualquer (M), é necessária sua aplicação mediante o emprego do fertilizante, M (adubo), que contém o elemento em falta. Isto significa que a prática da adubação, consiste em cobrir a diferença entre a quantidade do nutriente exigida pela planta e o fornecimento pelo solo, multiplicado por um fator K, cujo valor numérico é sempre maior que 1, para compensar as perdas do adubo.

### 1.3 OS ELEMENTOS ESSENCIAIS

Somente a análise química da planta não é suficiente para o estabelecimento da essencialidade de um elemento. As plantas absorvem do solo, sem muita discriminação, os elementos essenciais, os benéficos e os tóxicos, podendo estes últimos, inclusive, levá-las à morte. "Todos os elementos essenciais devem estar presentes nos tecidos das plantas, mas nem todos os elementos presentes são essenciais". Segundo MALAVOLTA, 1980 (citando Arnon e Stout, 1939 e Ingen-Housz, século XIX), um elemento é considerado essencial quando satisfaz dois critérios de essencialidade:

- Direto - o elemento participa de algum composto ou de alguma reação, sem o qual ou sem a qual a planta não vive;
- Indireto - trata-se basicamente de um guia metodológico:
  - na ausência do elemento a planta não completa seu ciclo de vida;
  - o elemento não pode ser substituído por nenhum outro;
  - o elemento deve ter um efeito direto na vida da planta e não exercer apenas o papel de, com sua presença no meio, neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis para a planta.

A Tabela 1.2, apresenta cronologicamente um breve histórico da descoberta e demonstração da essencialidade dos elementos. Além do C, O e H (orgânicos), treze elementos (minerais) são considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas, sendo estes divididos por aspectos puramente quantitativos em dois grupos:

- Macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S
- Micronutrientes: B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn

Alguns elementos podem afetar o crescimento e desenvolvimento das plantas, embora não se tenha determinado condições para caracterizá-los como essenciais.

---

MARSCHNER (1986) inclui nesta categoria o sódio, silício, cobalto, níquel, selênio e alumínio. O Co é essencial para a fixação biológica do N<sub>2</sub> em sistemas livres e simbióticos (MARSCHNER,1986) e a essencialidade do Si (TAKAHASHI & MIYAKE,1977) e do Ni (BROWN et al.,1987) tem sido proposta.

**TABELA 1.2 Descoberta e demonstração da essencialidade dos elementos**

Elemento	Descobridor	Ano	Demonstração da Essencialidade	Ano
C	Xx	Xx	De Saussure	1804
H	Cavendish	1766	De Saussure	1804
O	Priestley	1774	De Saussure	1804
N	Rutherford	1772	De Saussure	1804
P	Brand	1772	Ville	1860
S	Xx	Xx	Von Sachs, knop	1865
K	Davy	1807	Von Sachs, knop	1860
Ca	Dany	1807	Von Sachs, knop	1860
Mg	Dany	1808	Von Sachs, knop	1860
Fe	Xx	Xx	Von Sachs, knop	1860
Mn	Scheele	1744	McHargue	1922
Cu	Xx	Xx	Sommer	1931
			Lipman & Mac Kinnon	1931
Zn	Xx	Xx	Sommer & Lipman	1926
Mo	Hzelm	1782	Arnon & Stout	1939
B	Gay Lussac & Thenard	1808	Sommer & Lipman	1926
Cl	Schell	1774	Broyer et al	1954

FONTE: GLASS (1989), EM BATAGLIA ET AL.,(1992).

Os macronutrientes têm, em geral, seus teores expressos em percentagem (%) e os micronutrientes em partes por milhão (ppm), todos na forma elementar. A única distinção na classificação entre macro e micronutrientes é a concentração exigida pelas plantas. Os macronutrientes ocorrem em concentrações de 10 a 5.000 vezes superior à dos micronutrientes. EPSTEIN (1975) apresentou as concentrações médias dos nutrientes minerais na matéria seca, suficientes para um adequado desenvolvimento das plantas (tabela 1.3); embora deve-se ter presente, porém, que muita variação existe dependendo da planta e do órgão analisado.

**TABELA 1.3** Concentração média dos nutrientes minerais na matéria seca suficientes para um adequado desenvolvimento das plantas

Elementos	Concentração na matéria seca		Número relativo de átomos
	$\mu$ moles/g	Ppm	
Mo	0,001	0,1	1
Cu	0,10	6	100
Zn	0,30	20	300
Mn	1,0	50	1000
Fé	2,0	100	2000
B	2,0	20	2000
Cl	3,0	100	3000
		%	
S	30	0,1	30000
P	60	0,2	60000
Mg	80	0,2	80000
Ca	126	0,5	125000
K	250	1,0	250000
N	1000	1,5	1000000

Fonte:EPSTEIN (1975).

Segundo MALAVOLTA (1980), às vezes os micronutrientes são referidos como “oligoelementos”, “elementos traços”, “elementos menores”, ou “microelementos”; tais expressões não devem ser utilizadas pelos seguintes motivos: oligo quer dizer “raro” e os micronutrientes são comuns a todas as plantas superiores: embora ocorram em pequena proporção, o resultado pode ser quantificado – os teores estão acima do que se considere como traços; não são “menores” nas suas funções pois o crescimento e a produção poderão ser limitados (diminuídos ou impedidos) tanto pela falta de Mo como pela de N; “microelemento” é qualquer elemento, nutriente ou não, que apareça em proporção considerada como muito pequena. Do mesmo modo “macroelemento” não é sinônimo de macronutriente: o arroz e a cana-de-açúcar contêm altas proporções de Si que não é essencial.

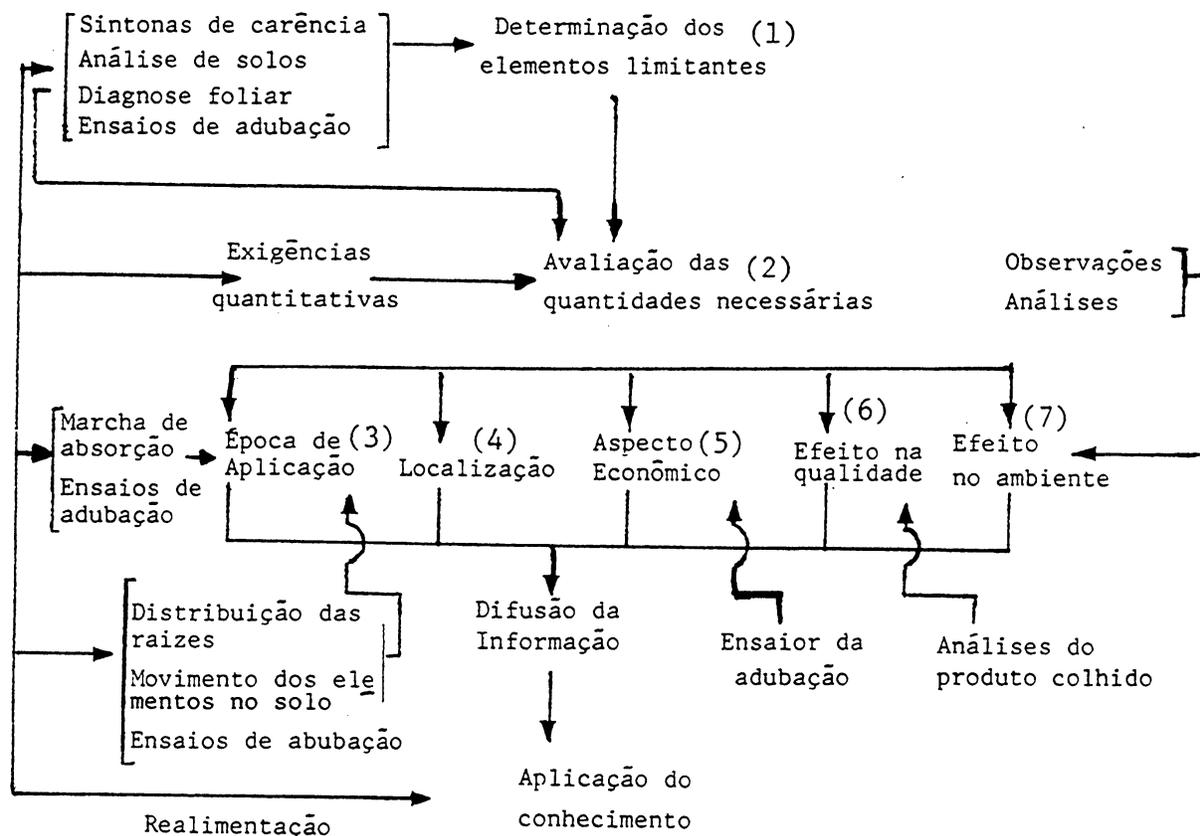
#### **1.4 REAÇÕES ENTRE NUTRIÇÃO MINERAL, FERTILIDADE DO SOLO E ADUBAÇÃO**

A adubação pode ser definida como a adição de elementos (nutrientes) de que a planta necessita para viver, com a finalidade de obter colheitas compensadoras de produtos de boa qualidade nutritiva ou industrial, provocando-se o mínimo de perturbação no ambiente. Em resumo, sempre que o fornecimento dos nutrientes pelo solo (reservatório) for menor que a exigência da cultura, torna-se necessário recorrer ao uso de adubos.

Segundo MALAVOLTA (1987), qualquer que seja a cultura, quaisquer que sejam as condições de solo e de clima, na prática da adubação procura-se responder a sete perguntas:

- 1) quê? qual nutriente está deficiente;
- 2) quanto? quantidade necessária;
- 3) quando? época em que deve ser fornecido;
- 4) como? maneira como tem que ser aplicado;
- 5) pagará? aspecto econômico;
- 6) efeito na qualidade do produto?
- 7) efeito na qualidade do ambiente?

A resposta a cada pergunta demanda experimentação e pesquisa nas áreas de nutrição mineral, fertilidade do solo e adubação. Os conhecimentos adquiridos serão difundidos e aplicados pelo agricultor; novas indagações estabelecerão um mecanismo de realimentação. A Figura 1.1 ilustra as relações entre as áreas, com o objetivo de responder às questões formuladas, a saber:



**FIGURA 1.1** As relações entre nutrição de plantas, fertilidade do solo e adubação (MALAVOLTA, 1976).

### 1) Determinação dos elementos limitantes

- **sintomas de carência:** anormalidades visíveis e específicas do elemento em falta no solo;

- **análise do solo:** avaliação quantitativa do elemento em falta;

- **diagnose foliar:** a composição da folha indica o elemento que falta no solo;

- **ensaios de adubação:** identificação do elemento em falta através da resposta diferencial da planta à aplicação de adubos.

### 2) Estabelecimento das quantidades necessárias

- **exigências quantitativas:** a análise mineral da planta dá as quantidades dos elementos exigidos;

- **análise do solo:** calibradas com ensaios de adubação pode dar as quantidades a aplicar;

- **ensaios de adubação:** determinação das doses necessárias por interpolação ou extrapolação dos resultados obtidos em experimentos, nos quais se verificou a resposta da planta à adição de quantidades diferentes de fertilizante ou corretivo.

### 3) Época de aplicação

- **análise periódica da planta:** determinação dos períodos de maior exigência;

- **ensaios de adubação:** fornecimento dos elementos em épocas diversas, seguido de observação do seu efeito na produção e na composição da planta.

### 4) Localização

- **distribuição do sistema radicular:** determinação da distribuição das raízes absorventes por observação direta ou por medida da absorção do elemento colocado em diferentes posições no solo;

- **comportamento do elemento no solo:** mecanismos que determinam o contacto entre o elemento e a raiz, como preliminar obrigatória para sua absorção;

- **ensaios de adubação:** absorção do elemento colocado em posições diferentes relativamente à semente ou à planta, medida pela colheita ou pela análise da cultura.

### 5) Rentabilidade

- **análises da relação entre preço de adubo e lucro obtido:** dados de ensaios de adubação com doses crescentes do elemento.

---

6) Efeito na qualidade do produto colhido

- **análises químicas ou sensoriais:** alterações provocadas pelo adubo na composição do produto ou na sua aceitação pelo consumidor.

7) Efeito na qualidade do ambiente

- **observações e análises de solo, água e ar:** alterações nos teores de constituintes normais, aparecimento de produtos estranhos; seu efeito no homem e no animal.

Considerando-se a adubação como um fim, verifica-se, pelo exposto, que para atingí-lo há necessidade de um esforço interdisciplinar e harmonioso entre nutrição de plantas e fertilidade do solo.

---

## ABSORÇÃO, TRANSPORTE E REDISTRIBUIÇÃO

---

---

### 2.1 ABSORÇÃO IÔNICA RADICULAR

#### 2.1.1 Introdução

Algumas definições são necessárias:

**Absorção** – processo pelo qual o elemento M passa do substrato (solo, solução nutritiva) para uma parte qualquer da célula (parede, citoplasma, vacúolo).

**Transporte ou translocação** – é a transferência do elemento, em forma igual ou diferente da absorvida, de um órgão ou região de absorção para outro qualquer (p. ex. da raiz para a parte aérea).

**Redistribuição** – é a transferência do elemento de um órgão ou região de acúmulo para outro ou outra em forma igual ou diferente da absorvida (p. ex. de uma folha para um fruto; de uma folha velha para uma nova).

Pensou-se durante muito tempo que os elementos contidos na solução do solo fossem absorvidos por simples difusão, caminhando a favor de um gradiente de concentração, indo de um local de maior (a solução externa) para outra de menor (o suco celular) concentração. Quando, entretanto, compararam-se as análises do suco celular com a do meio em que viviam diferentes espécies, verificou-se que, de modo geral, a concentração interna dos elementos era muito maior daquela do meio externo e que havia uma certa seletividade na absorção dos elementos. Isto é o que mostra a Tabela 2.1.

---

**TABELA 2.1** Relação entre a concentração de íons no suco celular e no meio

Íon	Nitella clavata			Valonia macrophysa		
	A.	B.	Relação	A.	B.	Relação
	Água doce	Suco celular	B/A	Água do mar	Suco celular	B/A
	-----	Mm	-----	-----	Mm	-----
Potássio	0,05	54	1.080	12	500	42
Sódio	0,22	10	45	498	90	0,18
Cálcio	0,78	10	13	12	2	0,17
Cloro	0,93	91	98	580	597	1

Fonte: Hoagland (1948), em MARSCHNER (1986).

Em plantas superiores, embora em menor intensidade, a seletividade também é uma característica do processo de absorção iônica (Tabela 2.2.). A concentração de potássio, fosfato e nitrato reduz marcadamente com o tempo, em relação ao sódio e sulfato. A taxa de absorção, especialmente do K e do Ca, difere entre as espécies e a concentração iônica interna é geralmente maior que a do meio; isto é mais evidente no caso do potássio, fosfato e nitrato.

**TABELA 2.2** Mudanças na concentração de íons na solução e a concentração no suco celular das raízes de milho e feijão

Íon	Concentração externa			Concentração no Suco celular	
	Inicial	Após 4 dias		Milho	Feijão
		Milho	Feijão mM		
	-----			-----	
Potássio	2,00	0,14	0,67	160	84
Cálcio	1,00	0,94	0,59	3	10
Sódio	0,32	0,51	0,58	0,6	6
Fosfato	0,25	0,06	0,09	6	12
Nitrato	2,00	0,13	0,07	38	35
Sulfato	0,67	0,61	0,81	14	6

Fonte: MARSCHNER (1986).

Os resultados apresentados nas tabelas demonstram que a absorção iônica é caracterizada por:

Seletividade – certos elementos minerais são absorvidos preferencialmente;

Acumulação – a concentração dos elementos, de modo geral, é muito maior no suco celular do que na solução externa;

Genótipo – existem diferenças entre espécies de plantas nas características de absorção.

Assim, algumas questões podem ser formuladas: como a célula ou a planta regula a absorção iônica? Como os íons ultrapassam as membranas plasmáticas (plasmalema e tonoplasto) e contra um gradiente de concentração? Estes aspectos serão discutidos ainda neste capítulo.

### 2.1.2. O Contato do íon com a raiz

Para que o íon seja absorvido é necessário que ocorra o estabelecimento do contato íon-raiz, que se faz através dos seguintes processos:

**Intercepção radicular** – à medida que a raiz se desenvolve, entra em contato com íons da fase líquida e sólida do solo. A contribuição deste processo é muito pequena e a quantidade é proporcional à relação existente entre a superfície das raízes e a superfície das partículas do solo.

**Fluxo de massa** – é o movimento do íon em uma fase aquosa móvel (= solução do solo), devido a um gradiente de tensão da água adjacente (mais úmida). Os elementos dissolvidos são assim carregados pela água para a superfície radicular por de massa; a quantidade de M que pode entrar em contato com a raiz por este processo é:

$$Q_{fm} = [M] \times V$$

Onde:

[M] = concentração do elemento na solução do solo

V = volume de água absorvido pela planta

Neste processo, os nutrientes são transportados no solo a maiores distâncias.

**Difusão** – é o movimento do íon em um fase aquosa estacionária a curtas distâncias e obedece a lei de Fick:

$$F = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

onde:

F = velocidade de difusão (quantidade difundida, em moles, por unidade de secção na unidade de tempo)

$dc/dx$  = gradiente de concentração

c = concentração (moles/l)

x = distância (cm)

---

D = coeficiente de difusão

Maiores detalhes do transporte de nutrientes no solo por estes processos são dados no Módulo 3 deste curso (**Fertilidade do Solo: Dinâmica e Disponibilidade de Nutrientes**).

A contribuição relativa dos três processos no suprimento de nutrientes para o milho é dada na Tabela 2.3. O fluxo de massa é importante para o N, Ca, Mg, S e micronutrientes, e a difusão é o principal processo de contato do P e K do solo com as raízes. Estes processos são alguns dos fatores que determinam a localização do adubo em relação à semente ou à planta. Os adubos contendo os elementos que se movem por difusão, por exemplo, devem ser localizados de modo a garantir o maior contato com a raiz, pois caso contrário, devido ao pequeno movimento, as necessidades da planta poderão não ser satisfeitas.

**TABELA 2.3 Contribuição relativa da interceptação radicular, do fluxo de massa e da difusão no fornecimento de nutrientes para as raízes do milho num solo barro limoso**

Íon	Absorção <sup>1</sup> ---(Kg/ha)---	Quantidades fornecidas por		
		Intercepção -----	Fluxo de massa (Kg/ha)	Difusão -----
N(NO <sub>3</sub> )	170	2	168	0
P(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	35	0,9	1,8	36,3
K(K)	175	3,8	35	136
Ca(Ca <sup>2+</sup> )	35	66	175	0
Mg(Mg <sup>2+</sup> )	40	16	105	0
S(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	20	1	19	0
Na(Na <sup>+</sup> )	16	1,6	18	0
B(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	0,20	0,2	0,70	0
Cu(Cu <sup>2+</sup> )	0,16	0,01	0,35	0
Fe(Fe <sup>2+</sup> )	1,90	0,22	0,53	0,17
Mn(Mn <sup>2+</sup> )	0,23	0,11	0,05	0,08
Mo(HMO <sub>4</sub> )	0,01	0,001	0,02	0
Zn(Zn <sup>2+</sup> )	0,30	0,11	0,53	0

<sup>1</sup> Colheita total

Parte aérea- 15.680 Kg/ha

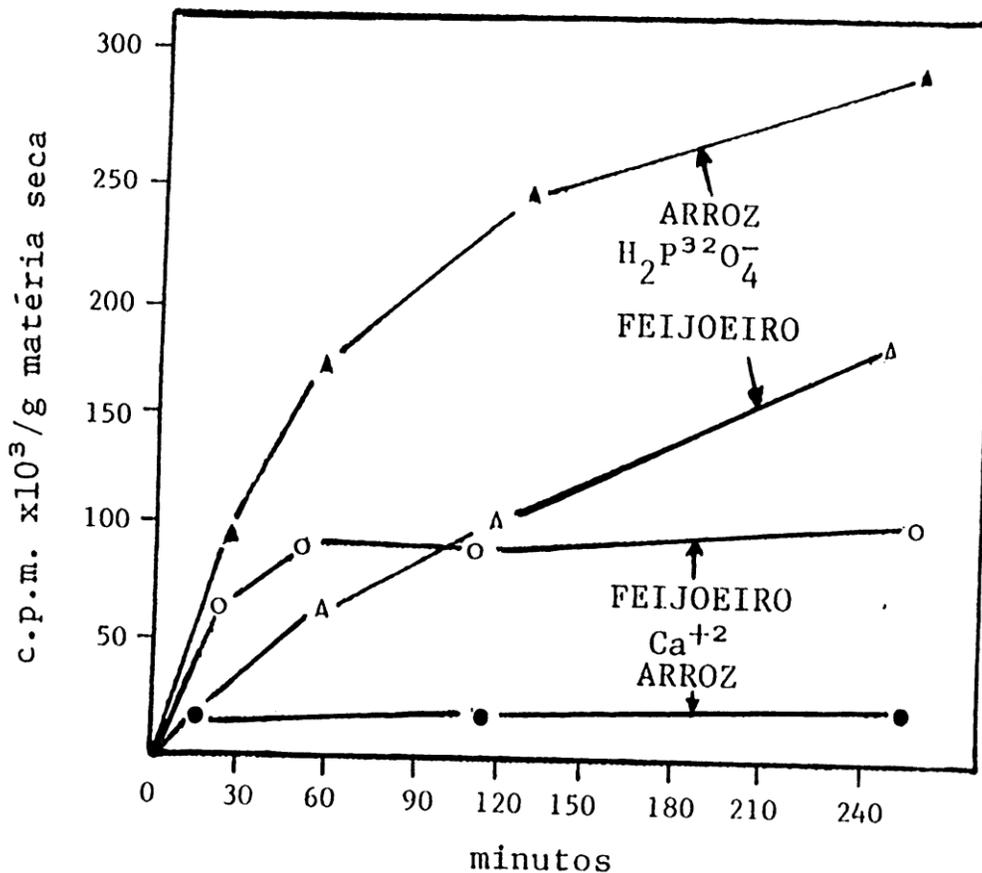
Grãos-9.470 Kg/ha

Fonte: Barber (1966), MALAVOLTA (1980).

### 2.1.3 Mecanismos de absorção

Quando se colocam raízes destacadas para absorver íons de uma solução em

função do tempo, encontra-se freqüentemente os resultados representados na Figura 2.1, onde se estudou a absorção de fósforo e cálcio pelo arroz e feijoeiro (de 30 minutos até 4 horas).



**FIGURA 2.1** Curva de absorção de cálcio e fósforo radioativos por raízes destacadas de arroz e de feijoeiro

(MALAVOLTA et al, 1989).

No caso dos dois elementos, particularmente no do cálcio, verifica-se que as curvas desdobram-se em dois segmentos: o primeiro deles corresponde a um período mais rápido de absorção que vai até 30-60 minutos; o segundo, que dura até o fim do período experimental, é mais lento.

Os dois segmentos definem dois tipos de mecanismo de absorção:

**Passivo** – corresponde à ocupação do apoplasto radicular; o elemento entra sem que a célula necessite gastar energia, deslocando-se de uma região de maior concentração, a solução externa, para outra de menor concentração, a qual corresponde à parede celular, espaços intercelulares e superfície externa do plasmalema; essas regiões delimitam o Espaço Livre Aparente (ELA) e a quantidade de M nele contida corresponde a uns 15% do total absorvido; essa entrada processa-se por fluxo de massa,

difusão, troca iônica, equilíbrio de Donnan; os mecanismos passivos rápidos e reversíveis, isto é, o elemento M contido no ELA pode sair dele.

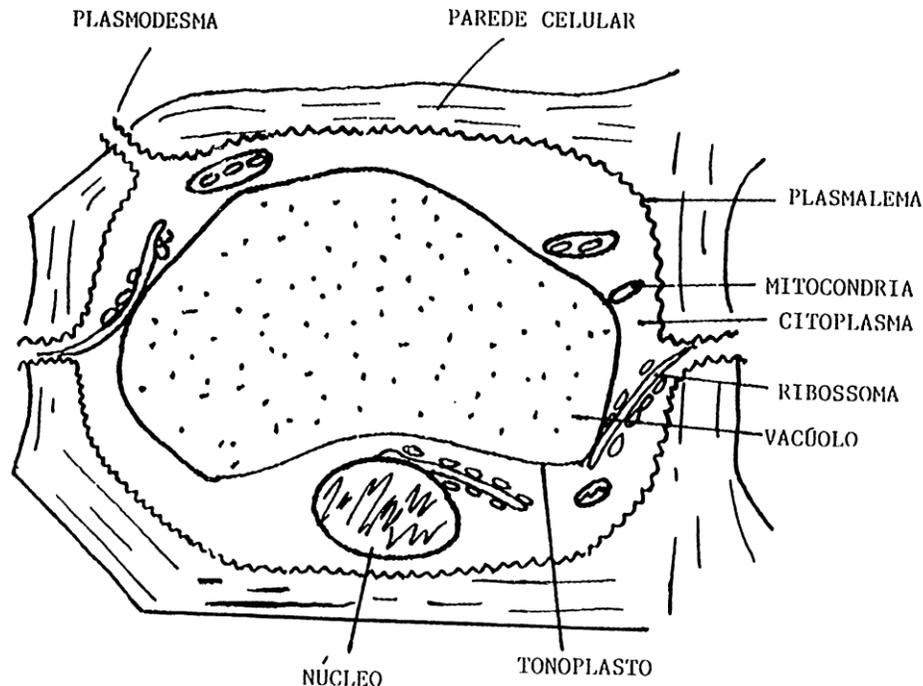
O ELA compreende o “Espaço Livre da Água,” no qual os íons são livremente acessíveis e o “Espaço Livre de Donnan” onde, devido à presença de cargas negativas originadas de radicais carboxílicos ( $R-COO^-$ ) dos componentes da parede celular, os cátions podem acumular por troca iônica e os ânions são repelidos. A distribuição de íons no Espaço Livre de Donnan é a mesma que ocorre na superfície carregada negativamente das partículas de argila no solo. Os cátions divalentes apresentam uma troca preferencial nestes sítios. As plantas diferem consideravelmente na capacidade de troca de cátions (CTC) nas suas raízes: 10-30 meg/100 g de raiz seca no caso das monocotiledôneas e 20-90 no caso das dicotiledôneas.

Embora a CTC não seja um passo essencial na passagem dos íons através da membrana plasmática para o citoplasma, a mesma apresenta um efeito indireto que é o aumento da concentração de cátions no apoplasto. Como resultado, uma correlação positiva tem sido observada entre a CTC de raízes e a absorção de  $Ca^{2+}$  e  $K^+$  em diferentes espécies de plantas.

**Ativo** – trata-se da ocupação do simplasto radicular e corresponde ao segundo segmento na figura. Faz com que M atravesse a barreira lipídica (gordurosa) da plasmalema, atingindo o citoplasma. Deste, o elemento pode chegar ao vacúolo depois de vencer a outra barreira representada pelo tonoplasto. Para isso, a célula tem que gastar energia (ATP) fornecida pela respiração, uma vez que M caminha de uma região de menor concentração (ELA) para outra de maior concentração. O mecanismo ativo é lento e irreversível; M só deixa o citoplasma ou o vacúolo se as membranas forem danificadas.

Portanto, as membranas plasmáticas são as responsáveis pela seletividade na absorção de cátions e ânions e constituem-se numa efetiva barreira para a difusão de íons para o citoplasma (influxo) ou no sentido contrário, do citoplasma para o ELA (efluxo). A figura 2.2, mostra esquematicamente uma célula vegetal o que facilita o entendimento.

---



**FIGURA 2.2** Representação esquemática dos componentes da célula vegetal

As membranas plasmáticas são estruturas complexas intrincadas de proteínas, lípídeos e, em menor proporção, de carboidratos, cujas moléculas apresentam grupos hidrofílicos (grupos OH, NH<sub>2</sub>, fosfato, carboxílico) e regiões hidrofóbicas (cadeias de hidrocarbonetos). Os componentes ligam-se por pontes de hidrogênio, ligações eletrostáticas e hidrofóbicas. Em média a composição das membranas é de aproximadamente 55% de proteínas (estrutural e enzimas de transporte), 40% de lípídeos e 5% de carboidratos (MENGEL & KIRKBY, 1987).

As proteínas não têm somente uma função estrutural, mas freqüentemente são enzimas e, assim, responsáveis por reações bioquímicas. Aquelas que se estendem através das membranas formam canais entre as duas faces (interna e externa), o que pode ser importante para a passagem de partículas hidrofílicas, como moléculas de água e íons inorgânicos.

Os lípídeos têm a função de impedir a difusão de solutos hidrofílicos, p.ex., íons inorgânicos, aminoácidos e açúcares, através das membranas. Os lípídeos mais importantes das membranas são os fosfolípídeos, glicolípídeos e esteróis. O grupo fosfato dos fosfolípídeos podem ligar-se eletrostaticamente ao grupo NH<sub>3</sub><sup>+</sup> das proteínas, entre si ou com grupos carboxílicos das proteínas através das pontes de cálcio. Assim, o CA assume particular importância na manutenção da estrutura e funcionamento das membranas, como será discutido no item 2.1.5 deste capítulo.

Resumindo, no processo ativo de absorção o íon deve vencer as barreiras da plasmalema e do tonoplasto e dá-se contra gradiente de concentração; é lento,

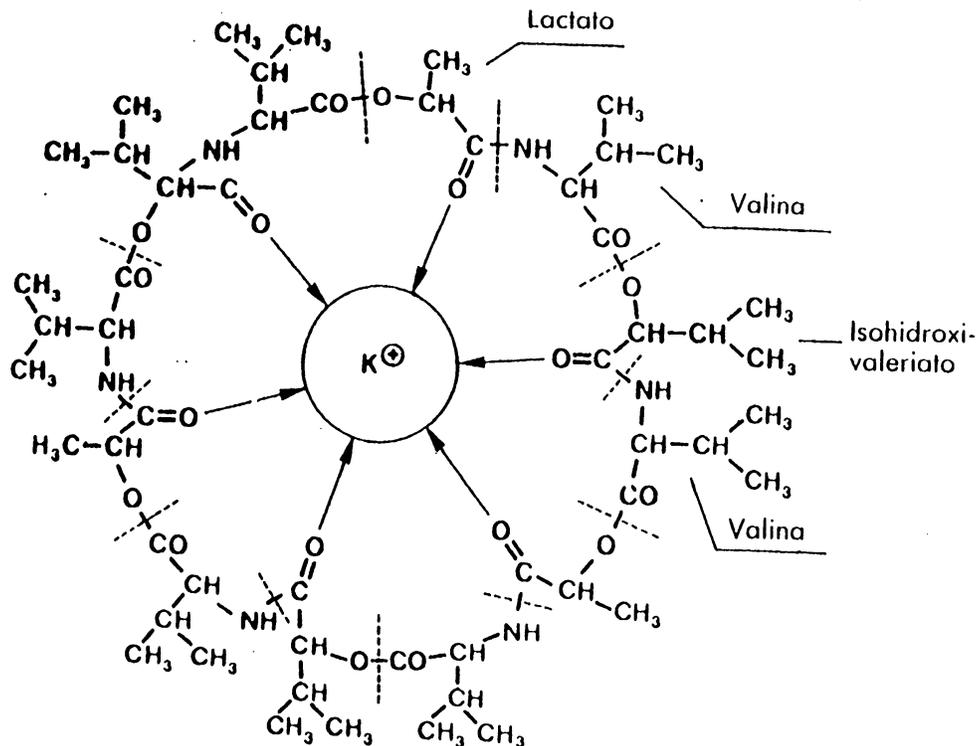
irreversível e necessita da introdução de energia. Recorda-se na Tabela 2.2, por exemplo, que a concentração de K no suco celular de raízes de milho é 80 vezes maior do que no meio externo. Em contraste, a concentração de sódio apresenta pouca diferença entre os dois meios.

O mecanismo (ou mecanismos) para a absorção ativa, metabólica, ainda não está totalmente esclarecido. É aceito que um íon ou uma molécula para serem absorvidos requerem uma ligação específica com um “carregador”, e existe uma exigência direta ou indireta de energia para que o transporte seja realizado.

Atualmente é aceito que a membrana biológica contém moléculas chamadas ionóforos, as quais têm um importante papel no transporte de íons através da membrana.

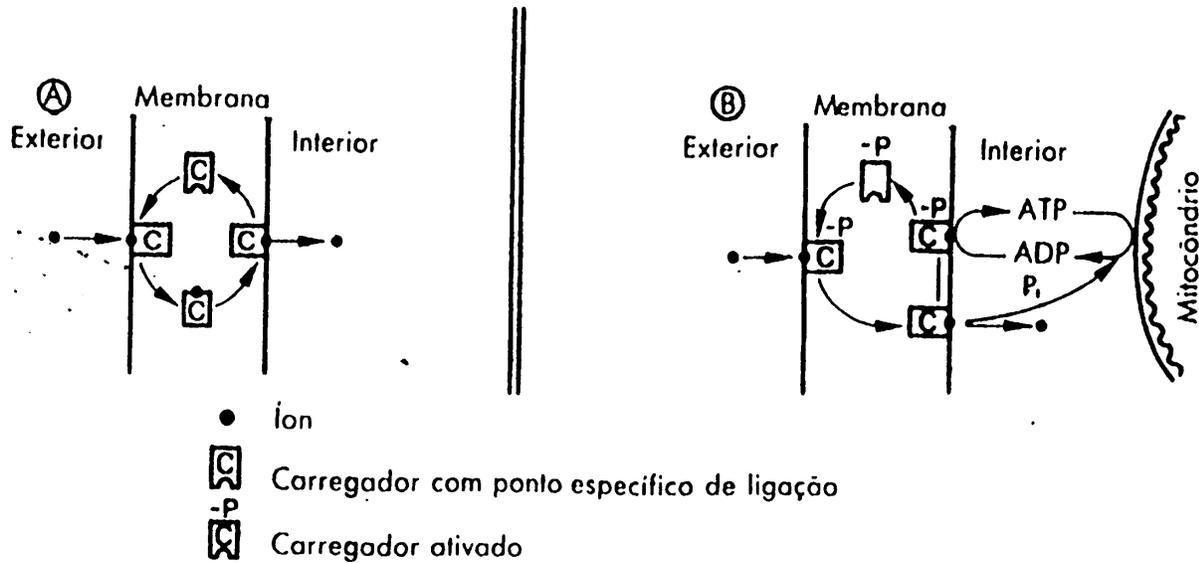
Os ionóforos são moléculas orgânicas com alto peso molecular, que são capazes de formar complexos solúveis com lipídeos e cátions. Nestes complexos o cátion é aprisionado no interior da molécula orgânica por ligações dipolares com átomos de oxigênio de grupos carbonil, carboxil, álcool e éter.

Na Figura 2.3. está apresentada a estrutura do ionóforo valinomicina, produzido pela espécie *Streptomyces* (MENGEL & KIRKBY, 1987). A molécula consiste de três seqüências de lactato-valina-isohidroxi-valeriato-valina.



**FIGURA 2.3** Estrutura do complexo valinomicina-K<sup>+</sup> (MENGEL & KIRKBY, 1987).

A ligação carregador-íon, transporte e consumo de energia na forma de ATP, que é regenerado do ADP + Pi via respiração, estão apresentados na Figura 2.4, conforme MARSCHNER (1986).

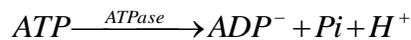


**FIGURA 2.4** Modelo de um carregador de membrana transportador de íons (A), associado ao gasto de energia (fosforilação oxidativa) e ao transporte iônico (B) (MARSCHNER, 1986).

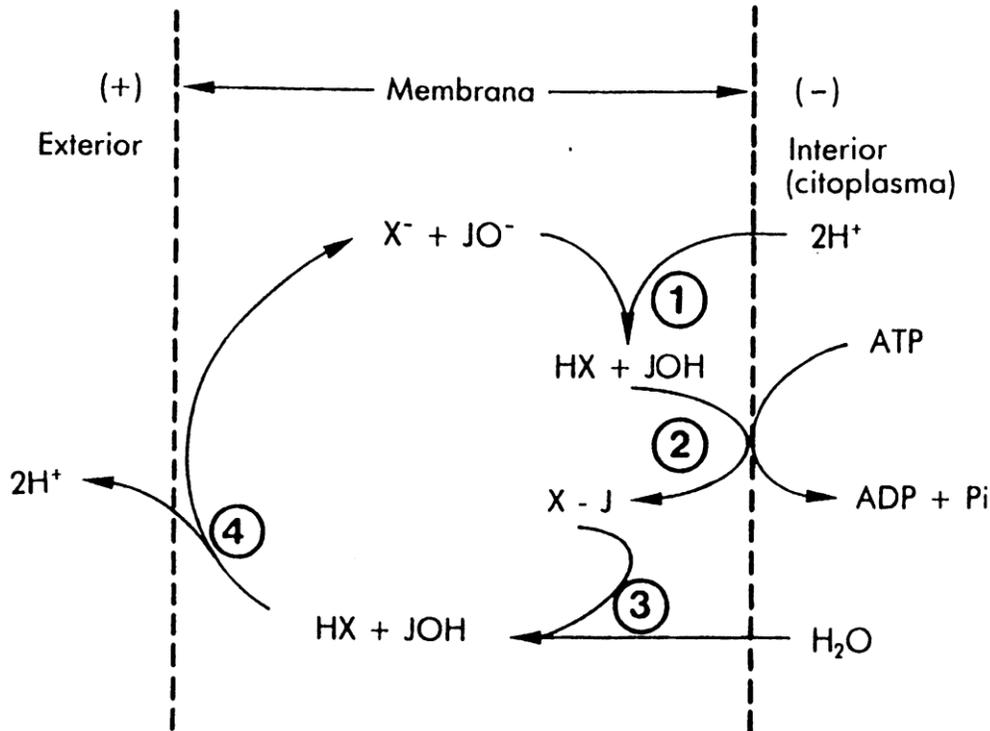
**Bomba Iônica e ATPase**

A bomba iônica, um mecanismo associado à atividade de ATPases de membranas, tem sido proposto para avaliar a energia gasta e o transporte iônico ativo através de membranas (MENGEL & KIRKBY, 1987).

As ATPases, localizadas nas membranas, e ativadas por cátions com diferentes especificidades (uns mais, outros menos), são capazes de desdobrar o ATP em ADP mais P-inorgânico, quando há liberação de energia para ser utilizada no transporte iônico. Pode-se indicar o desdobramento da seguinte maneira:

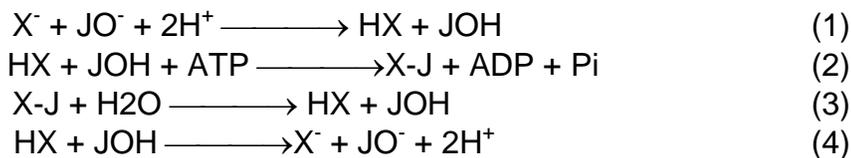


Um esquema hipotético mostrando os possíveis mecanismos de ação de uma ATPase está apresentado na Figura 2.5.



**FIGURA 2.5** Esquema hipotético de uma bomba de H<sup>+</sup> (ATPase), bombeando 2 H<sup>+</sup> por 1 ATP para fora da célula

As reações admitidas podem ser apresentadas assim:



A enzima induz a um gradiente de pH através da membrana pelo bombeamento do H<sup>+</sup> para fora da célula. Por este processo, o lado interno (citoplasma) torna-se relativamente mais negativo ou alcalino (-) que o externo (+). O potencial resultante consiste de componentes eletroquímicos que podem ser descritos pela equação:

$$Pmf = \Delta pH + \Delta \psi$$

onde:

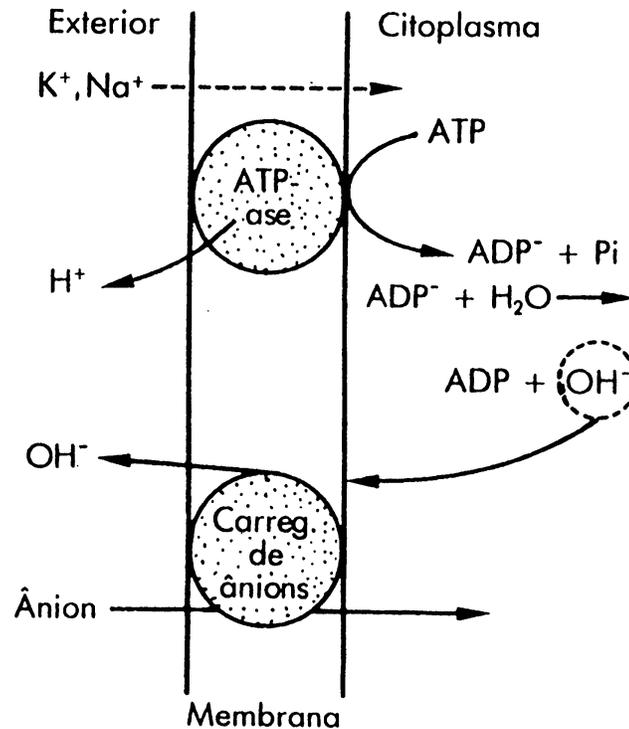
Pmf = força motriz protômica ou gradiente eletroquímica do H<sup>+</sup>  
Através da membrana.

$\Delta pH$  = diferença na concentração de H<sup>+</sup> nos dois lados da membrana

$\Delta \psi$  = diferença no potencial elétrico através da membrana

A força motiva protônica (Pmf) é a força pela qual os prótons são transportados contra um gradiente eletroquímico através da membrana. O processo de transporte tem todas as características de transporte ativo. A energia necessária é derivada do ATP e tem-se mostrado que o potencial da bomba de  $H^+$  é diretamente dependente do suprimento de ATP. Supõe-se que a expulsão de 2  $H^+$  consome uma molécula de ATP. Basicamente, a bomba de prótons induz a um gradiente de pH através da membrana e o mecanismo reverso produz ATP nos tilacóides das membranas dos cloroplastos ou nas membranas internas da mitocôndria. O princípio da bomba de prótons, como mostrado no esquema hipotético da Figura 2.5, está estreitamente relacionado com o processo de fosforilação de MITCHELL (1966). No primeiro passo, carregadores  $X^-$  e  $JO^-$  da membrana reagem com  $H^+$  do citoplasma (reação 1). Os produtos resultantes  $HX$  e  $JOH$  induzem à hidrólise do ATP (reação 2) para a formação do complexo X-J. Este complexo é hidrolisado (reação 3) em dois compostos  $HX$  e  $JOH$ , os quais são desprotonados do outro lado da membrana (reação 4). Ocorre então a formação novamente de  $X^-$  e  $JO^-$  e inicia-se um novo ciclo. O resultado final desta sequência de reações é a transferência de 2  $H^+$  através da membrana associada à hidrólise de uma molécula de ATP. Por este processo, um potencial eletroquímico é construído através da membrana, com o lado de dentro da membrana tornando-se mais negativo em relação ao lado de fora. Cátions que estão do lado de fora da membrana são, então, trocados por  $H^+$ , o que a despolariza. Este tipo de absorção de cátions depende da permeabilidade da membrana, a qual difere consideravelmente para os vários tipos de cátions.

A absorção de ânions não pode ser explicada como um processo a favor do potencial elétrico, pois neste caso a carga negativa move-se em direção à célula carregada negativamente. Supõe-se que ânions do meio externo podem ser absorvidos e trocados por  $OH^-$  ou  $HCO_3^-$ . HODGES (1973) propôs um modelo hipotético levando em consideração a absorção de cátions e de ânions por células de plantas. O modelo mostrado na Figura 2.6, representa uma ATPase e um carregador de ânions. A ATPase torna o citoplasma mais alcalino e o  $OH^-$  citoplasmático aciona o carregador de ânions. Hidroxilas são expulsas e ânions são absorvidos pelas células. Se ATPases estão diretamente envolvidas na absorção ativa de ânions, não está ainda completamente esclarecido.



**FIGURA 2.6** Modelo de uma ATPase como carregadora de cátions associada a um carregador de ânions (HODGES, 1973).

#### 2.1.4 Cinética da absorção iônica

A absorção de íons pelas plantas é dependente de suas concentrações no meio. Esta relação não é linear, mas segue uma curva assintótica. A Figura 2.7 mostra uma curva experimental de como varia a absorção de fósforo por raízes de arroz e de feijoeiro, quando aumenta a concentração do mesmo na solução externa: a absorção cresce rapidamente a princípio (baixas concentrações) e depois tende a ficar mais ou menos constante, em concentrações mais altas, tendendo assim para um valor máximo assintótico. A curva é muito semelhante à que se obtém quando a velocidade de uma reação enzimática é colocada em função da concentração do substrato. Esta analogia foi vista claramente pela primeira vez por EPSTEIN & HAGEN (1952), que relacionaram o processo de um carregador de íons através de membranas com a atividade enzimática em um substrato. A equação matemática que define a relação entre as duas variáveis (velocidade e concentração) e que preenche os requisitos de uma curva hiperbólica (Figura 2.7) é a equação de Michaelis-Menten. Aplicando-a à absorção iônica tem-se:

$$V = \frac{V_{max} \cdot [M]}{K_m + [M]}$$

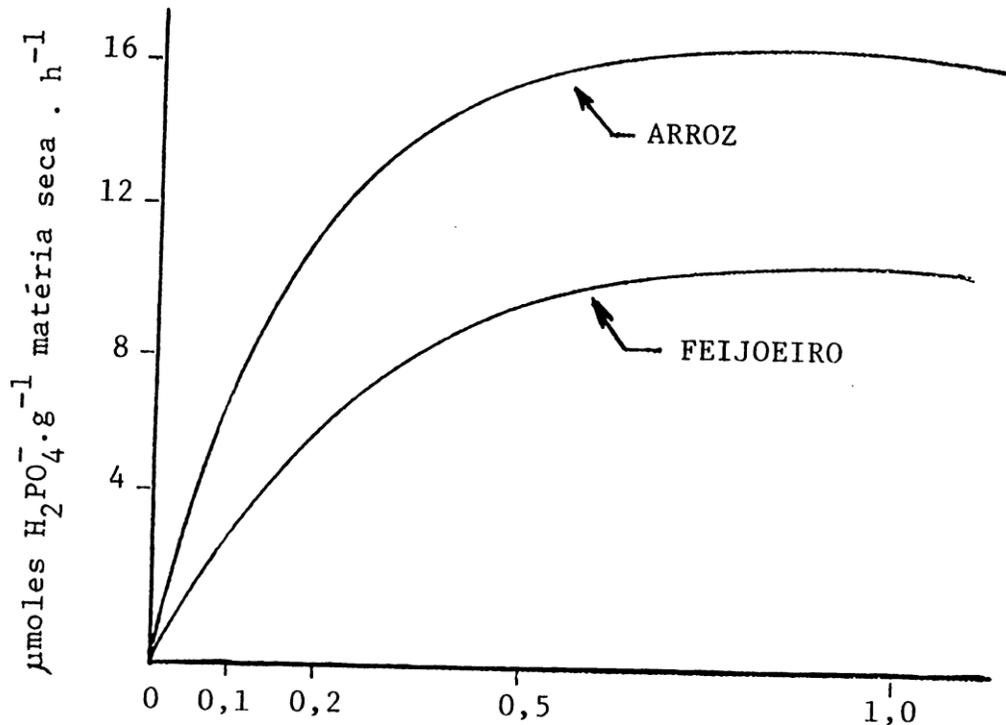
Onde:

$V$  = velocidade de absorção = quantidade de  $M$  absorvido na unidade de tempo por unidade de peso de raiz

$V_{max}$  = velocidade máxima de absorção = quantidade absorvida quando todas as moléculas do carregador estiverem "ocupadas" transportando íons

$[M]$  = concentração externa do elemento  $M$

$K_m$  = constante de Michaelis-Meten = concentração do elemento no meio que garante  $\frac{1}{2}$  da  $V_{max}$  = medida da afinidade do elemento pelo carregador.



**FIGURA 2.7** Efeito da concentração externa de fosfato na absorção por raízes de arroz ( $K_m = 0,167 \mu\text{moles/l}$ ) e feijoeiro ( $K_m = 0,229$ ). (MALAVOLTA et al., 1989)

O valor do  $k_m$  é calculado fazendo-se:

$$V = \frac{V_{max}}{2}$$

Substituindo-se na equação, tem-se:

$$\frac{V_{max}}{2} = \frac{V_{max} \cdot [M]}{K_m + [M]} \therefore \frac{1}{2} = \frac{[M]}{K_m + [M]}$$

$$K_m + [M] = 2[M] \therefore K_m = [M]$$

Assim,  $K_m$  corresponde à concentração externa do elemento que garante metade da velocidade máxima de absorção. Quanto menor o  $K_m$ , maior é a afinidade do M pelo seu carregador. Neste sentido, os dados da Figura 2.7 sugerem que o carregador de fósforo de raiz de arroz tenha maior afinidade, isto é, seja mais eficiente que o do feijoeiro.

O  $V_{max}$  e o  $K_m$  são, portanto, os parâmetros cinéticos de absorção e características da própria planta que conferem à mesma uma maior ou menor capacidade de absorção do elemento a uma dada concentração no meio.

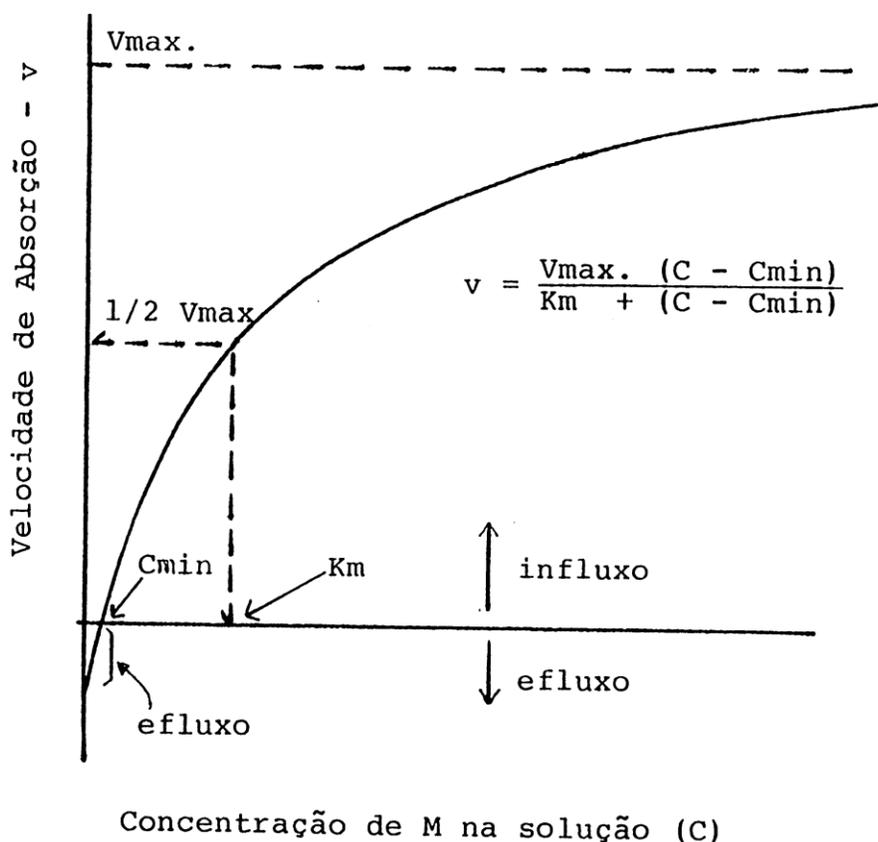
Como as raízes das plantas não esgotam completamente o nutriente M da solução, mas reduzem-no a uma “concentração mínima” onde o influxo = efluxo ( $V=0$ ), daí a introdução de um novo parâmetro, também característica da própria planta, na equação de Michaelis-Menten, a “concentração mínima” ( $C_{min} = [M]_{min}$ ):

$$V = \frac{V_{max} \cdot ([M] - [M]_{min})}{K_m + ([M] - [M]_{min})}$$

A representação gráfica da cinética de absorção de M levando em consideração a  $C_{min}$  encontra-se na Figura 2.8. Do ponto de vista prático, interessam espécies e variedades que apresentam  $K_m$  e  $C_{min}$  baixos, pois isto significa, pelo menos em princípio, que as mesmas serão capazes de aproveitar-se de baixos níveis do elemento no solo. A Tabela 2.4, mostra como podem variar os valores dos parâmetros cinéticos de absorção em função de elementos, espécies e mesmo entre variedades da mesma espécie.

A determinação da eficiência de absorção de dada forma iônica, por exemplo P como  $H_2PO_4$ , feita essencialmente com base em  $K_m$  e/ou  $C_{min}$ , a seleção de espécies, cultivares e genótipos de plantas quanto à tolerância a alumínio (Al) e a baixos níveis de P no meio de crescimento; os estudos envolvendo a verificação e a avaliação dos efeitos de condições de estresse hídrico sobre a absorção de íons, além dos trabalhos relativos à interferência de dado nutriente (íon) sobre a absorção de outro – antagonismos, sinergismos, o efeito de micorrizas no processo de absorção de P, etc – são alguns exemplos nos quais a cinética de absorção iônica constitui valioso instrumento metodológico, quando não essencial.

A determinação experimental (gráfica ou matemática) dos valores dos parâmetros cinéticos da absorção iônica,  $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ , pode ser vista no ítem **Determinação dos parâmetros cinéticos de absorção ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ ) iônica radicular, pelo método da exaustão**, detalhada mais adiante.



**FIGURA 2.8** Cinética da absorção levando-se em consideração o  $C_{min}$  (= influxo líquido)

**TABELA 2.4** Parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes de algumas espécies e cultivares

Espécies	Elemento	Parâmetros Cinéticos			
		$V_{max}$ N mot/m <sup>2</sup> .s	$K_m$ ----- μmol/l	$C_{min}$ -----	
Arroz (sequeiro)	K	13	25	2	
Arroz (BR-IRGA-409)	K	16	19	2,5	
Arroz (EEA - 406)	K	13	5,5	1,8	
Arroz (Bluebelle)	K	11	-	-	
Coiza	P	0,4	2	0,4	
Milho	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10	10	4	
	P	4	3	0,2	
	K	40	16	1	
Soja	P	0,8	2	0,1	
Trigo	P	5,1	6	3	

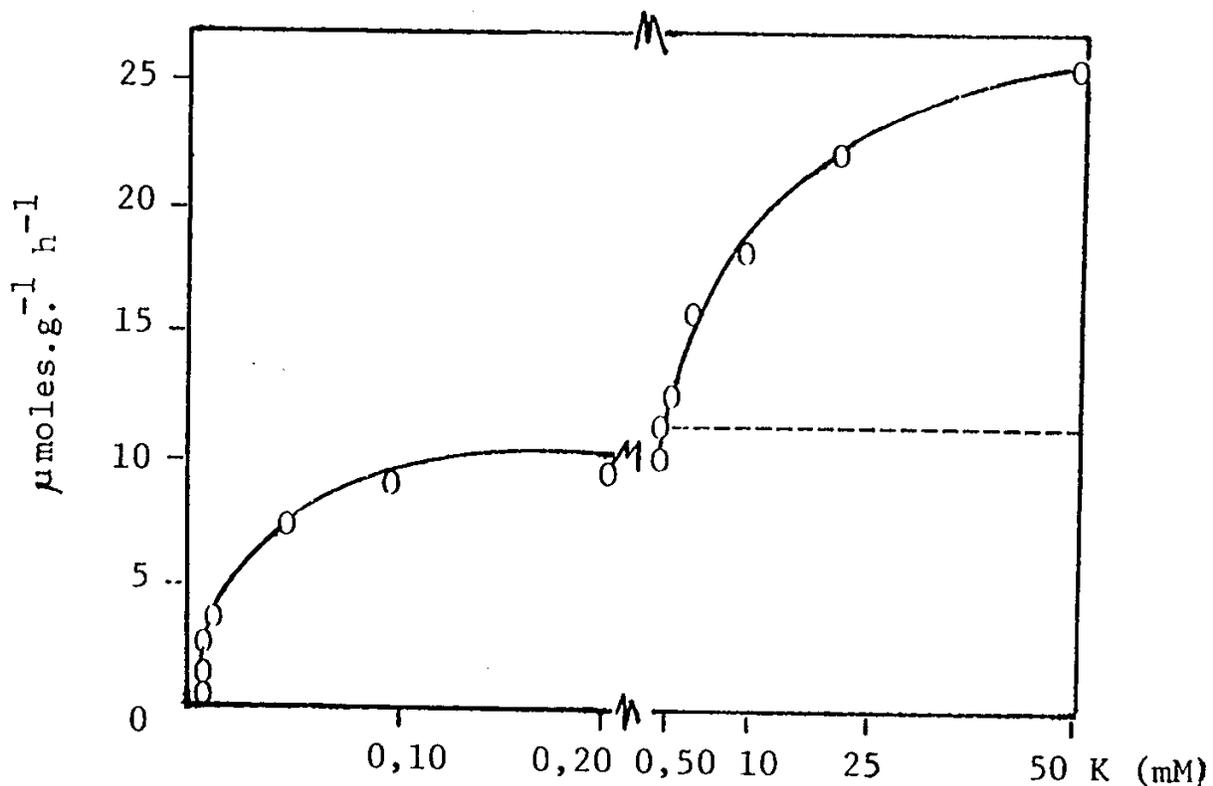
Fonte: VOLKWEISS (1986).

Se a faixa de variação na concentração de M for suficientemente ampla (de baixas para muito altas), quando se faz o gráfico de Michaelis verifica-se o aparecimento de duas isotermas, conforme se vê na Figura 2.9, a qual define o chamado “mecanismo duplo” de absorção:

O primeiro mecanismo (ou carregador) apresenta alta afinidade pelo K ( $K_m=0,021\text{mM}$ ) e funciona na faixas concentrações;

O segundo mecanismo (ou carregador) mostra afinidade baixa pelo íon ( $K_m = 20\text{mM}$ ) e opera na faixa de altas concentrações.

É possível que o mecanismo 2 atue quando se faz adubações potássicas pesadas no sulco de plantio em solos com baixa capacidade de troca catiônica, já que isso aumenta muito a concentração do elemento na solução do solo.

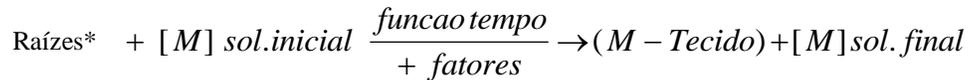


**FIGURA 2.9** Operação do mecanismo duplo para absorção de potássio por raízes de cevada (EPSTEIN, 1975).

## Determinação dos parâmetros cinéticos de absorção ( $V_{max}$ , $K_m$ e $C_{min}$ ) iônica radicular, pelo método da exaustão

### Introdução

Esquemáticamente, pode-se representar um ensaio de absorção iônica radicular como se segue:



\*Raízes – destacadas ou planta inteira

A quantidade absorvida:

M absorvido = [M] solução inicial – [M] solução final, ou

M absorvido = (M - Tecido) – análise do material

### Métodos

#### Tradicional

Coloca-se plantas (raízes) para absorver M em soluções com concentrações crescentes e em cada concentração mede-se a velocidade ( $v$ ) de absorção (= quantidade de M abs/unidade de raiz x unidade tempo), obtendo-se a curva que relaciona: [M] solução =  $x$ , com a  $v = y$ . Esta curva, normalmente, é uma hipérbole equilátera, representada pela equação de Michaelis e Menten, como visto:

$$V = \frac{V_{max} \cdot [M]}{K_M + [M]}$$

No cálculo dos parâmetros cinéticos, ajustam-se os dados experimentais de [M] x  $v$ , à forma linear da equação de Michaelis e Menten, segundo as transformações propostas por LINEWEAVER & BURK (1934), HOFSTEE (1952) ou outra.

#### Método de exaustão do M da solução (CLAASSEN & BARBER, 1974)

Consiste em colocar-se a planta absorver M em solução de concentração conhecida, e medir a sua depleção em função do tempo.

Este método, proposto por CLAASSEN & BARBER (1974), é usado para determinação dos parâmetros cinéticos de absorção iônica em baixas concentrações de M na solução e para plantas inteiras.

Tem a vantagem de exigir um menor número de plantas (vasos), para a obtenção da curva de absorção, em relação ao método tradicional, pois a própria planta estabelece a concentração de M na solução em função do tempo de absorção. Este método permite ainda a determinação da concentração mínima ( $[M]_{\min} = C_{\min}$ ), concentração esta onde  $V = 0$ , pois, de acordo com esta metodologia, as raízes das plantas não esgotam completamente o nutriente da solução, mas reduzem-no a uma concentração mínima onde o influxo = efluxo (influxo líquido = 0).

Assim, para a determinação do influxo líquido de M, um novo termo deve ser incluído na equação de Michaelis e Menten, como visto:

$$V = \frac{V_{\max} \cdot ([M] - [M]_{\min})}{K_m + ([M] - [M]_{\min})}$$

As flutuações dos valores de influxo de M, nos diferentes intervalos de amostragens, indicam a necessidade de grande rigor quando se trabalha com este método, porquanto podem ocorrer variações que são conseqüências próprias do manuseio da metodologia analítica e do material genético em estudo. Assim sendo, sugere-se trabalhar com o maior número de repetições possíveis e com duplicatas das alíquotas em cada período de amostragem.

O uso experimental deste método exige a realização de experimentos prévios, a fim de se determinar a concentração inicial de M na solução, para se obter a curva característica de exaustão de M, num período de 5-9 horas de absorção. Neste período, fazendo-se amostragens da solução em intervalos de 0,5 a 1,0 h, o número e pontos experimentais serão suficientes para a determinação dos parâmetros cinéticos de absorção ( $V_{\max}$ ,  $K_m$  e  $C_{\min}$ ). O uso de períodos de absorção muito prolongados é desaconselhável, devido ao crescimento do sistema radicular da planta neste período, o que irá mascarar os resultados. Mesmo assim, alguns pesquisadores (p. ex.: CANAL & MIELNICZUK, 1983; VILELA & ANGHINONI, 1984) deixam as plantas na solução de absorção por períodos maiores do que aquele necessário para a obtenção da curva de exaustão (5-9h), com finalidade de obter a  $C_{\min}$  após 24 h de absorção.

A Tabela 2.5., mostra um exemplo do manuseio deste método num experimento (uma repetição) de absorção de P pela soja IAC-2 (CASTELLS, (1984).

**TABELA 2.5** Concentração de fósforo na solução determinada nos diferentes períodos de amostragens e valores calculados do influxo de fósforo para o Genótipo IAC-2

Tempo H	P		P			- 1 -	- 2 -
	Conc. $\mu\text{M}$	Volume ml	Quant. $\mu\text{moles}$	$\Delta Q$ $\mu\text{moles}$	$\Delta Q/\Delta t$ $\mu\text{moles.h}^{-1}$	Influxo P $\mu\text{moles.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$	Influxo P $\mu\text{moles.g}^{-1}.\text{h}^{-1}$
0,0	21,15	1499,00	31,704	-	-	-	-
0,5	19,192	1492,45	28,643	3,061	6,122	0,452	-
1,0	17,601	1484,90	26,136	2,507	5,104	0,370	0,411
1,5	15,581	1477,35	23,019	3,117	6,234	0,460	0,460
2,0	14,603	1469,60	21,462	1,557	3,114	0,230	-
2,5	12,216	1462,25	17,863	3,599	7,198	0,531	0,381
3,0	10,235	1454,70	14,889	2,974	5,948	0,439	0,439
4,0	6,410	1441,60	9,241	5,648	5,648	0,417	0,417
5,0	4,085	1428,50	5,835	3,406	3,406	0,251	0,251
6,0	2,027	1415,40	2,869	2,966	2,966	0,219	0,219
6,5	1,193	1407,85	1,679	1,190	2,380	0,176	0,176
7,0	0,834	1400,30	1,168	0,510	1,022	0,075	0,075
7,5	0,520	1392,75	0,724	0,440	0,888	0,066	0,066
8,0	0,551	1385,20	0,763	-	-	-	-
8,5	0,344	1377,65	0,473	0,290	0,580	0,043	0,043
9,0	0,260	1370,10	0,356	0,117	0,234	0,017	0,017

Fonte: CASTELLS, 1984.

Observa-se:

A concentração inicial de P na solução foi de 21,15  $\mu\text{M}$  determinada previamente para obtenção da curva de depleção do P no intervalo de 0,0 a 9,0 h (Figura 2.10);

As amostragens foram feitas de 0,5 em 0,5 h até a 3ª h e após a 6ª; e de hora em hora da 3ª a 6ª h;

O volume inicial do vaso foi de 1,50 l;

O volume de solução em cada tempo de amostragem foi estimado, deduzindo-se do volume do tempo anterior a alíquota amostrada + volume transpirado (este foi estimado pesando-se o conjunto vaso + planta, no começo e no final do ensaio);

Sucessivamente, foram determinados: quantidade de P = Q;  $\Delta Q$ ;  $\Delta Q/\Delta t$  = Influxo P-1 e Influxo P-2;

O influxo-1 mostra as flutuações de valores nos diferentes intervalos de amostragem, o que normalmente ocorre; o influxo-2 trata-se de uma tentativa visando amenizar estas variações;

Ressalta-se que com apenas uma repetição (1 vaso) obteve-se 16 valores de [P] e seus respectivos influxos (=V); comparativamente ao método tradicional este exigiria 15 vasos;

Relacionando-se os valores de [P] e de v (influxo), os parâmetros cinéticos são determinados. Para isso, diferentes métodos podem ser utilizados, citando-se:

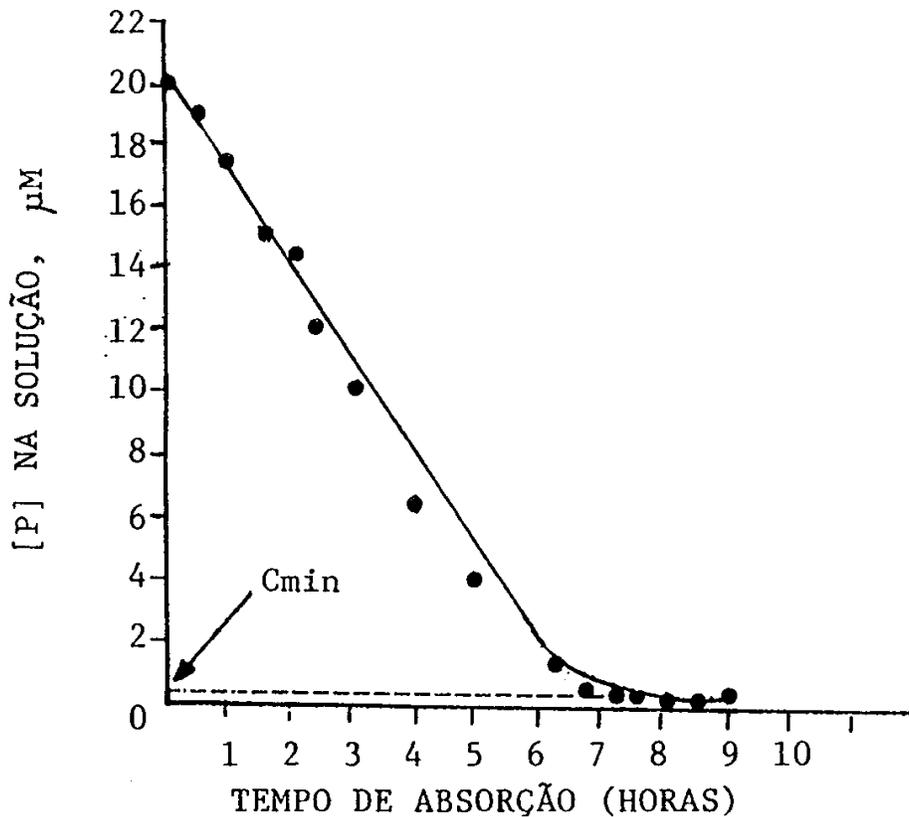
Método do duplo recíproco (LINEWEAVER & BURK, 1934)

Método de HOFSTEE (1952)

Método gráfico (CANAL & MIELNICZUK, 1983)

Método gráfico-matemático (RUIZ, 1985)

Método estatístico (WILKINSON, 1961)



**FIGURA 2.10** Exaustão do P da solução (dados da Tabela 2.5.)

Como exemplo de cálculo dos parâmetros cinéticos ( $V_{max}$  e  $K_m$ ), usando a transformação linear da equação de Michaelis-Menten segundo LINEWEAVER & BURK (1934), tem-se:

$$v = \frac{V_{max} \cdot [M]}{K_m + [M]} \quad = \text{equação de Michaelis-Menten}$$

Tomando-se a recíproca dos 2 termos:

$$\frac{1}{v} = \frac{[M] + Km}{V_{max} \cdot [M]}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{V_{max}} + \frac{Km}{V_{max}} \cdot \frac{1}{[M]}$$

onde:

$$\frac{1}{v} = y$$

$$\frac{1}{V_{max}} = a$$

$$\frac{Km}{V_{max}} = b$$

$$\frac{1}{[M]} = x$$

Portanto:

$$\frac{1}{V_{max}} = \text{ponto de intersecção na ordenada;}$$

$$\frac{Km}{V_{max}} = \text{coeficiente angular da reta}$$

No exemplo (Tabela 2.5.) tomando-se os valores dos inversos do influxo-2 ( $1/v = y$ ) e da concentração de P ( $1/[P] = x$ ) referentes aos tempos de 1,0 a 7,5 h, através da regressão linear entre as duas variáveis, obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{1}{v} = 1,62 + 7,402 \cdot \frac{1}{[P]}$$

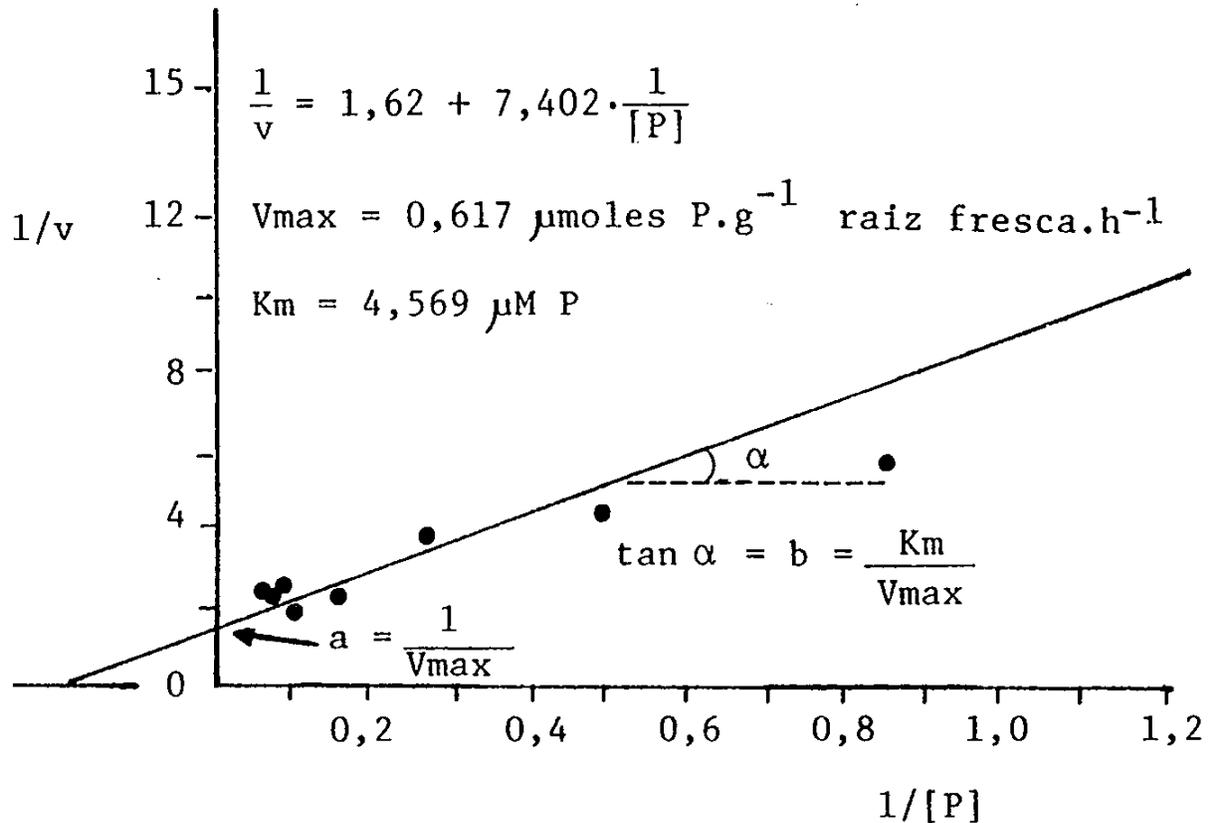
Como:

$$a = \frac{1}{V_{max}} \text{ e } b = \frac{Km}{V_{max}}; \text{ temos:}$$

$$V_{max} = 0,617 \mu\text{moles P} \cdot \text{g}^{-1}\text{raiz fresca} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$K_m = 4,569 \mu\text{MP}$$

Figura 2.11. mostra a representação gráfica deste método.



**FIGURA 2.11** Transformação de LINEWEAVER & BURK (dados da Tabela 2.5 de 1,0 a 7,5h; onde  $1/v = 1/\text{influxo-2}$  e  $1/[P] = 1/\text{concentração P}$ )

A representação da cinética de absorção de P absoluta, utilizando a equação de Michaelis-Menten é mostrada na Figura 2.12, e a taxa de absorção líquida, considerando na equação a  $C_{min}$  que aparece na Figura 2.13, a qual ilustra bem os parâmetros cinéticos discutidos ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ ).

Baseado no método gráfico-matemático (RUIZ, 1985) de determinação dos parâmetros cinéticos de absorção iônica RUIZ & FERNANDES F<sup>o</sup> (1992) elaboraram um Software para estimar as constantes  $V_{max}$  e  $K_m$ , o que facilita o processo e o torna mais preciso.

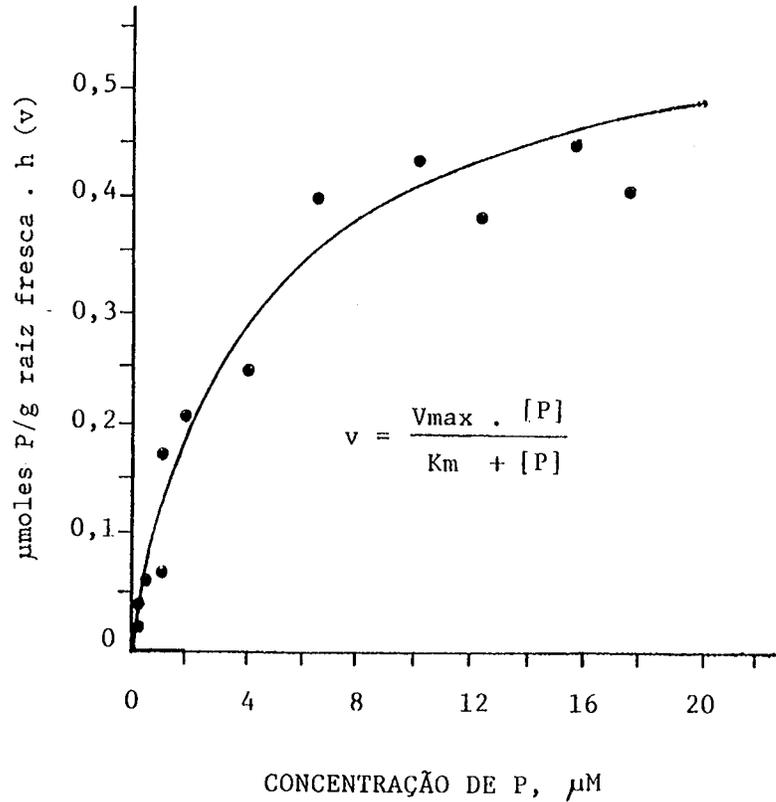


FIGURA 2.12 Representação da taxa de absorção de P absoluta.

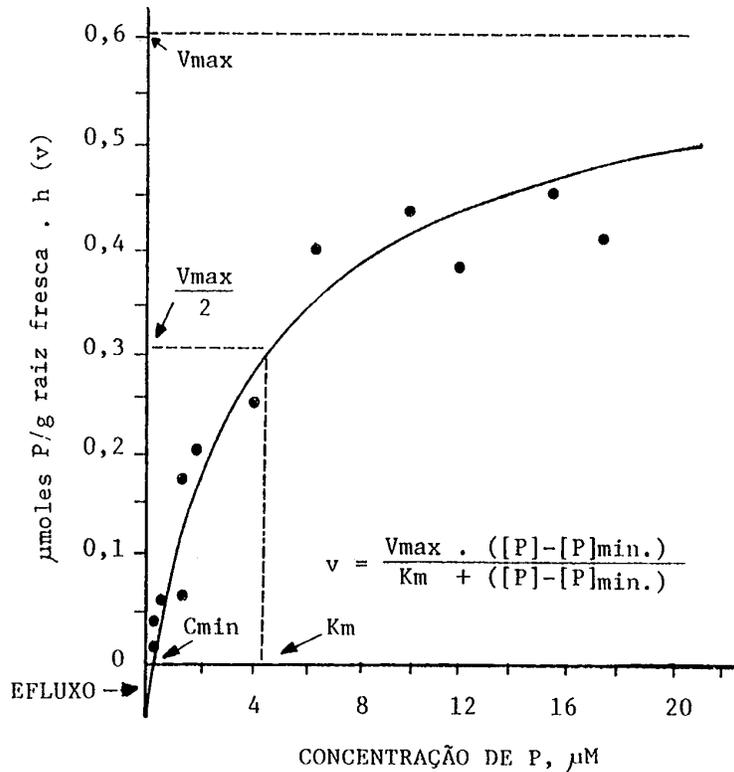


FIGURA 2.13 Representação da taxa de absorção de P líquida

### 2.1.5 Papel do Cálcio

Admite-se que o cálcio seja indispensável para a manutenção da estrutura e o funcionamento normal das membranas celulares. A permeabilidade das membranas a compostos hidrofílicos depende consideravelmente da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{H}^+$  no meio. Trabalhos têm mostrado que sob condições de pH menores que 4,5, as membranas tornam-se mais permeáveis favorecendo o efluxo (vazamento) de cátions – o  $\text{K}^+$  por exemplo. Este efeito desfavorável da acidez sobre a absorção de íons que é contrabalanceado pela presença de concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  tem sido considerado suficiente para a manutenção da permeabilidade normal das membranas.

Este efeito do  $\text{Ca}^{2+}$  é atribuído às pontes que o mesmo forma entre os radicais aniônicos dos componentes da membrana – fosfato dos fosfolipídeos e carboxílicos das proteínas. Em meio ácido o  $\text{Ca}^{2+}$  destas ligações é substituído por  $\text{H}^+$ , o que aumenta drasticamente a permeabilidade das membranas pelo uso de agentes quelantes e promove o mesmo efeito e o efluxo (vazamento) de íons e compostos orgânicos de baixo peso molecular é observado.

Este efeito do cálcio sobre a absorção iônica é chamado de efeito “Viets” (VIETS, 1944), que observou que a absorção de outros cátions ( $\text{K}^+$ , p. ex.) era estimulado pela presença do  $\text{Ca}^{2+}$  em baixas concentrações no meio.

A Figura 2.1.4. ilustra bem o efeito do pH e do cálcio na absorção de  $\text{K}^+$  por raízes de cevada. Em pH abaixo de 4,0, na ausência de  $\text{Ca}^{2+}$  no meio, a membrana perde suas características de transporte e de retenção de íons e o efluxo (vazamento) de  $\text{K}^+$  é observado. Na sua presença, o efeito depressivo do  $\text{H}^+$  foi reduzido, observando-se uma absorção líquida positiva (influxo) mesmo em valores de pH extremamente baixos.

Portanto, a manutenção de um nível adequado de cálcio no solo é necessário para garantir, entre outras coisas, a absorção adequada de nutrientes.

---

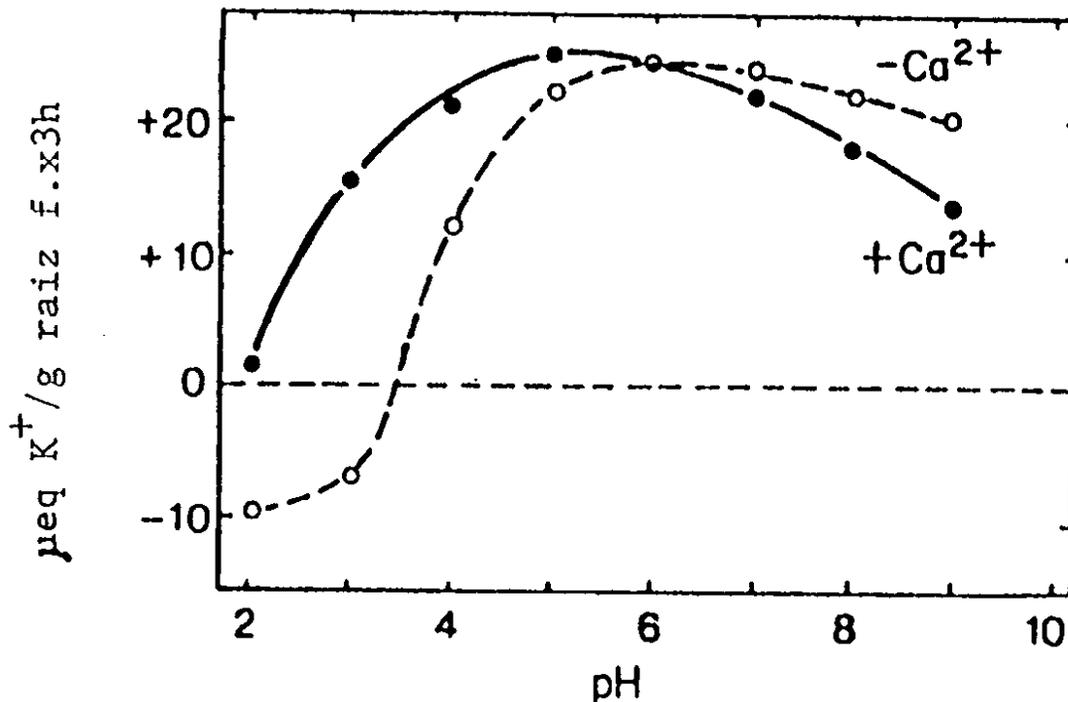
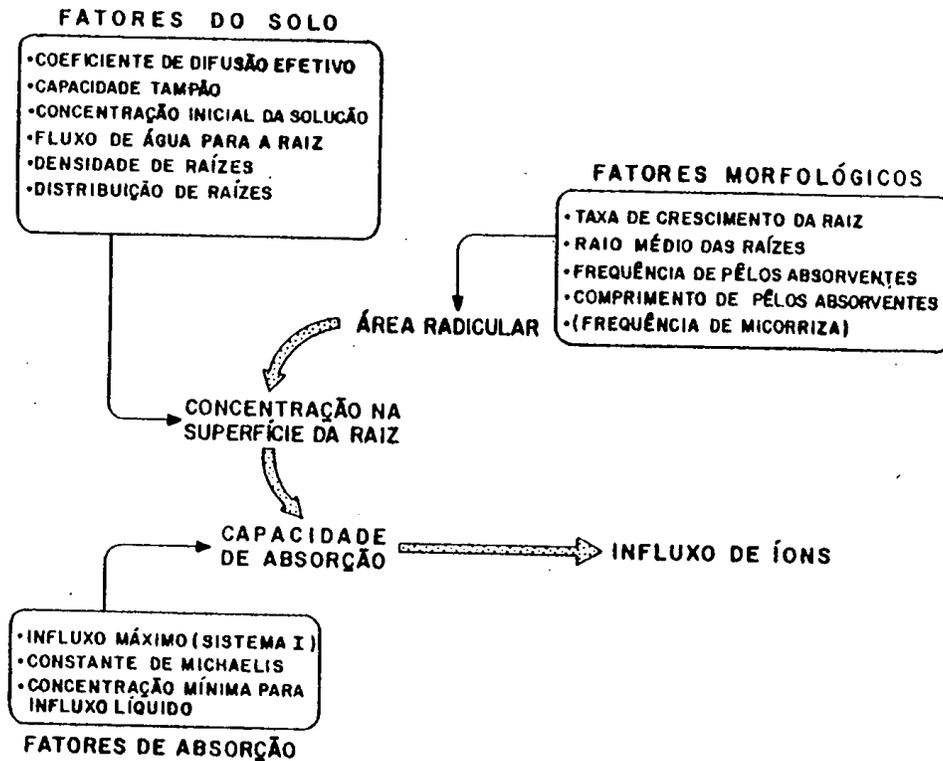


FIGURA 2.14 Absorção líquida de K<sup>+</sup> influenciada pelo pH e presença/ausência de Ca<sup>2+</sup> na solução externa. (Adaptado de MARSCHNER, 1986)

### 2.1.6 Fatores que afetam a absorção iônica radicular

Uma série de fatores externos (do meio) e internos (da planta) têm sido enumerados como influentes no processo de absorção. CLARKSON (1985) enumera diversos parâmetros que são utilizados nos modelos matemáticos para explicar a absorção de nutrientes do solo, que são distribuídos em vários grupos (Figura 2.15). Um grupo de fatores do solo, acrescido da taxa de transpiração da planta, define a taxa à qual um dado nutriente chegará à superfície da raiz, condição necessária, como visto, para que um nutriente seja absorvido. Neste grupo também estão incluídos parâmetros de distribuição de raízes. Um segundo grupo de parâmetros define a taxa de crescimento da superfície de absorção, chamados de fatores morfológicos, os quais condicionarão a área ou superfície absorvida do sistema radicular. A grande influência de fungos micorrízicos – VA na absorção de P é devido ao aumento da área de absorção. Um terceiro grupo ( $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$ ). Portanto, fatores relacionados com a disponibilidade dos nutrientes no solo, com as características morfológicas do sistema radicular e com a capacidade de absorção (parâmetros cinéticos) pelas raízes, conferem à planta o ‘influxo de íons’, capaz ou não de atender suas exigências nutricionais.



**FIGURA 2.15** Esquema dos parâmetros que têm sido usados para elaborar modelos matemáticos para explicar a absorção de nutrientes pelas raízes no solo (CLARKSON, 1985).

Os principais fatores (externos e internos) e seus efeitos na absorção iônica radicular são apresentados a seguir:

## FATORES EXTERNOS

### a. Disponibilidade

A primeira condição para que o íon  $M$  seja absorvido é que o mesmo esteja na forma disponível e em contato com a superfície da raiz. Portanto, todos os fatores que afetam a disponibilidade, também afetam a absorção, citando-se como exemplos: o teor total do elemento no solo; pH; aeração; umidade; matéria orgânica; temperatura; presença de outros íons. O aumento da disponibilidade aumenta a concentração de íons na solução e, dentro de limites, a velocidade de absorção, como visto na Figura 2.7.

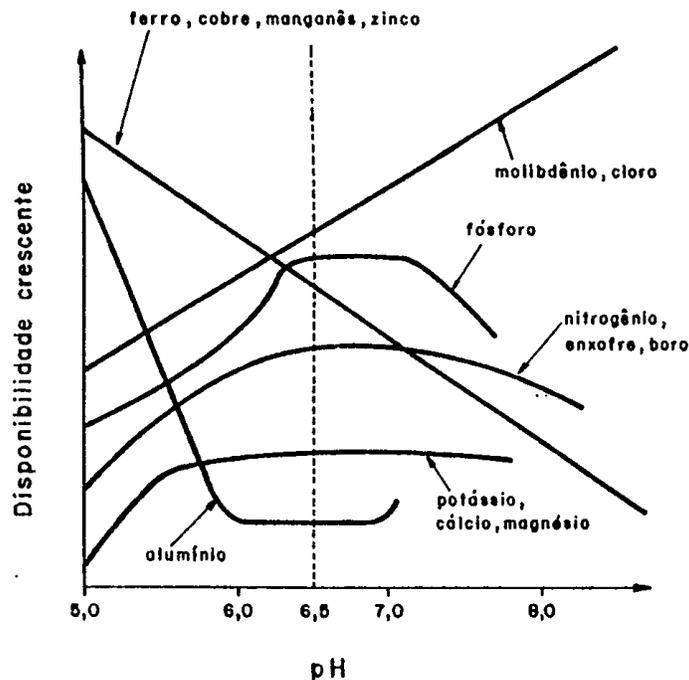
### b. pH

O pH apresenta um “efeito direto” na absorção pela competição entre o  $H^+$  e os outros cátions e do  $OH^-$  com os outros ânions. Como os valores de pH abaixo de 7,0 (ácido) são mais comuns em solos, o efeito do  $H^+$  tem tomado maior importância. Um padrão típico da influência do pH externo sobre a taxa de absorção de cátions foi mostrado na Figura 2.14, para o  $K^+$ . Com o aumento da concentração de  $H^+$  (abaixamento

do pH), a absorção de  $K^+$  declina drasticamente, principalmente na ausência de  $Ca^{2+}$ , onde em pH menor que 4,0 ocorre inclusive o efluxo (vazamento) do  $K^+$  interno (efeito já discutido no item 2.1.5.).

Entre os valores de pH 4,0 a 7,0 ocorreria a competição entre o  $H^+$  e o  $K^+$  pelos sítios dos carregadores na membrana. Entretanto, é bastante provável que com o abaixamento do pH, ou seja, aumento da concentração de  $H^+$  no meio externo, a eficiência da “bomba iônica” ligada a ATPases de membrana (discutida no item 2.1.3.) decresce e a absorção passiva de  $H^+$  é aumentada (MARSCHNER, 1986). Evidências para essa afirmação está na observação do decréscimo do eletropotencial de células radiculares de  $-150$  mV a pH 6,0 para  $-100$  mV a pH 4,0; com isso a absorção de cátions a pH baixo é inibida.

Um outro efeito do pH na absorção é denominado de “efeito indireto”; acredita-se que nas condições de solo este seja o principal e está relacionado com a disponibilidade dos elementos, nutrientes ou não. Pode-se dizer que maior disponibilidade é maior concentração de M na solução do solo e, portanto, maior absorção. A Figura 2.16 ilustra como o pH influencia a disponibilidade dos elementos no solo. Explicação detalhada deste comportamento é apresentada no Módulo 3 deste curso (Fertilidade do solo: Dinâmica e Disponibilidade de Nutrientes). A Figura mostra que, tal como acontece com o efeito direto do pH, para o efeito indireto a faixa de pH 6,0-6,5 é a mais favorável para o crescimento das plantas, visto que nesta faixa a disponibilidade de alguns nutrientes é máxima (caso dos macronutrientes) e não limitante para outros (micronutrientes). Aqui está uma das razões para a importância da calagem adequada de solos ácidos.

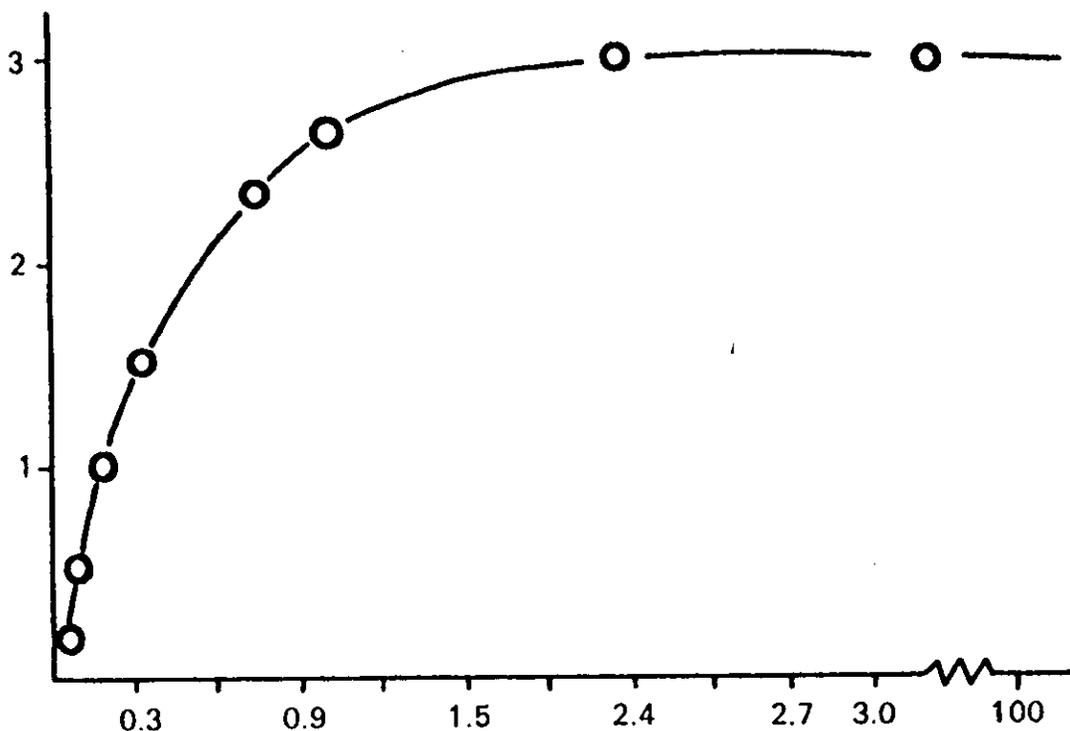


**FIGURA 2.16** Relação entre pH e disponibilidade de elementos no solo

### c. Aeração

Como visto no item 2.1.3. a absorção ativa depende de energia metabólica (ATP) originada na respiração. A Figura 2.17 mostra a relação entre a tensão de  $O_2$  e a taxa de absorção de P por raízes de cevada. Conseqüentemente, a deficiência nutricional é um dos fatores que limita o crescimento de plantas em solo (ou substrato) pobre em aeração. As práticas que aumentam a aeração do solo como aração, gradagem, subsolagem tendem a aumentar, pois, a absorção dos elementos do solo.

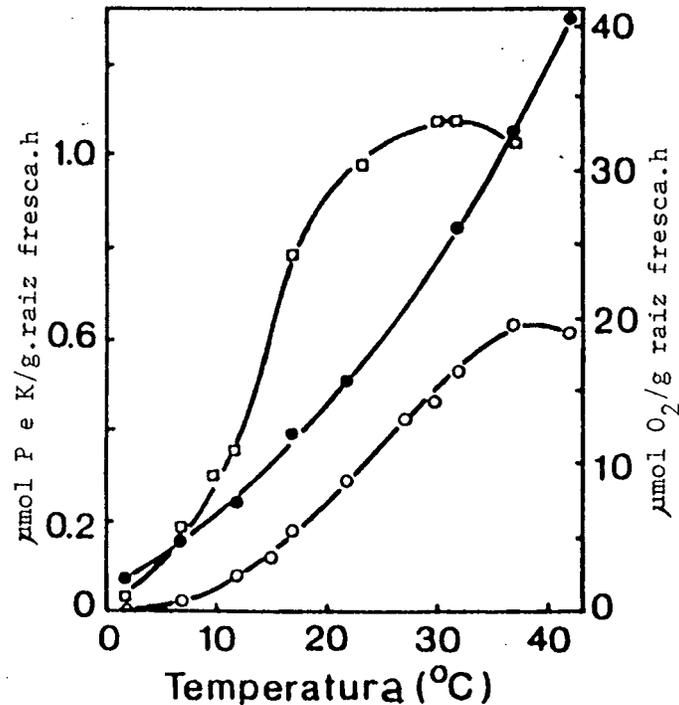
A aeração afeta também a disponibilidade dos nutrientes no solo como, por exemplo, a atividade de microorganismos que transformam a matéria orgânica, que oxidam  $NH_4^+$  a  $NO_3^-$  e  $S^{2-}$  a  $SO_4^{2-}$ , formas absorvidas pelas plantas, necessitam de  $O_2$ . A aeração, por outro lado, pode diminuir a disponibilidade do ferro, que é oxidado da forma ferrosa para a férrica, menos disponível; o contrário acontece nas condições de menor aeração onde o  $Fe^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  podem ser acumulados a níveis tóxicos em solos inundados.



**FIGURA 2.17** Efeito da tensão de  $O_2$  sobre a taxa de absorção de P por raízes destacadas de cevada (Hopkins, 1956, em MENGEL & KIRKBY, 1987).

### d. Temperatura

Na faixa de 0 a  $30^\circ C$  a absorção cresce de modo praticamente linear com a elevação da temperatura. Isto se explica pelo fato de que dentro de limites há um aumento da atividade metabólica da planta, principalmente a intensidade respiratória; o que é bem ilustrado na Figura 2.18.



**FIGURA 2.18** Efeito da temperatura sobre as taxas de respiração (●), absorção de P (◦) e K (◻) por segmentos de raiz de milho (Bravo e Uribe, 1981, em MARCHNER, 1986).

#### e. Umidade

Não se pode falar em disponibilidade de qualquer elemento em condições de solo seco. Para a mineralização do N, S, P, B etc. da matéria orgânica pela atividade microbiana, a água é particularmente necessária. A água também constitui-se no veículo natural para o movimento dos íons no solo (fluxo de massa, difusão). Como exemplo, considera-se o baixo teor de umidade no solo, como um fator preponderante para maiores incidências de “podridão apical” em frutos de tomate – um sintoma típico de deficiência de cálcio na cultura – mesmo em solos considerados férteis neste nutriente. Nestas condições, quantidades insuficientes de cálcio atingem as raízes por fluxo de massa, induzindo à anormalidade.

#### f. O próprio elemento

Os elementos são absorvidos com velocidades diferentes, em geral obedecendo à seguinte ordem decrescente:

ânions –  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$

cátions –  $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$

O íon acompanhante, como consequência disso, também influencia a absorção do seu par: assim, por exemplo, a absorção máxima do  $\text{NH}_4^+$  ocorrerá quando ele estiver

acompanhado de  $\text{NO}_3^-$ ; a velocidade será mínima se estiver junto com o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ .

g. Interação entre íons

Como a solução do solo apresenta uma gama altamente heterogênea de íons (Tabela 2.6), a presença de um pode modificar a velocidade de absorção de outro de duas maneiras: inibição e sinergismo.

**TABELA 2.6 Concentração dos elementos na solução do solo em micromoles/l**

Íon	Deficiente	Crítica	Média
$\text{NO}_3^-$	10 – 700	200 – 500	9.000
$\text{NH}_4^+$	0,5 – 400	2 – 1.800	-
$\text{K}^+$	1 – 100	3 – 120	800
$\text{Ca}^{2+}$	0,5 – 600	6 – 1.000	1.900
$\text{Mg}^{2+}$	2 – 300	9 – 400	3.100
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	0,1 – 12	0,2 – 90	< 1
$\text{SO}_4^{2-}$	-	4	1.200
$\text{Cu}^{2+ (1)}$	0,001	0,002	0,01 – 0,6
$\text{Mn}^{2+(1)}$	0,001 – 1	0,001 – 42	0,002 – 70
$\text{Zn}^{2+(1)}$	0,001 – 0,005	0,005 – 0,2	0,003 – 3

(1) 28-99,8% da concentração dada como complexos orgânicos.

Fonte: Asher & Edwards (1978) em MALAVOLTA et al., (1989).

Inibição – consiste na diminuição da absorção de M devido à presença de outro; é “competitiva” quando os dois elementos M e I (inibidor) se combinam com o mesmo sítio do “carregador” na membrana; é “não competitiva” quando a ligação se faz com sítios diferentes. No primeiro caso, o efeito do I pode ser anulado aumentando-se a concentração do M; o que não acontece no segundo caso. Um exemplo tradicional de inibição competitiva é observado entre o Ca, Mg e K (Tabela 2.7). Portanto, a manutenção de teores equilibrados destes cátions no solo através de calagem e de adubação adequadas, é um princípio básico para se evitar a indução de deficiência de alguns deles nas culturas por este processo.

**TABELA 2.7. Efeito do  $\text{K}^+$  e do  $\text{Ca}^{2+}$  sobre a absorção do  $^{28}\text{Mg}^{2+}$  por plântulas de cevada (concentração de cada cátion = 0,25 meq/l)**

Parte planta	$\text{Mg}^{2+}$ absorvido (meq/10 g raiz fresca . 8 h)		
	$\text{Mg Cl}_2$	$\text{MgCl}_2 + \text{CaSO}_4$	$\text{MgCl}_2 + \text{CaSO}_4 + \text{KCl}$
<b>Raiz</b>	<b>165</b>	<b>115</b>	<b>15</b>
<b>Parte aérea</b>	<b>88</b>	<b>25</b>	<b>6,5</b>

Fonte: Schimansky (1981), em MARSCHNER (1986).

Ocorrendo inibição há mudanças na transformação de Lineweaver & Burk, que passa a ser:

Competitiva:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{V_{max}} + \frac{K_m}{V_{max}} \cdot \frac{1}{[M]} \left( 1 + \frac{[I]}{K_I} \right)$$

onde:

[ I ] = concentração do inibidor

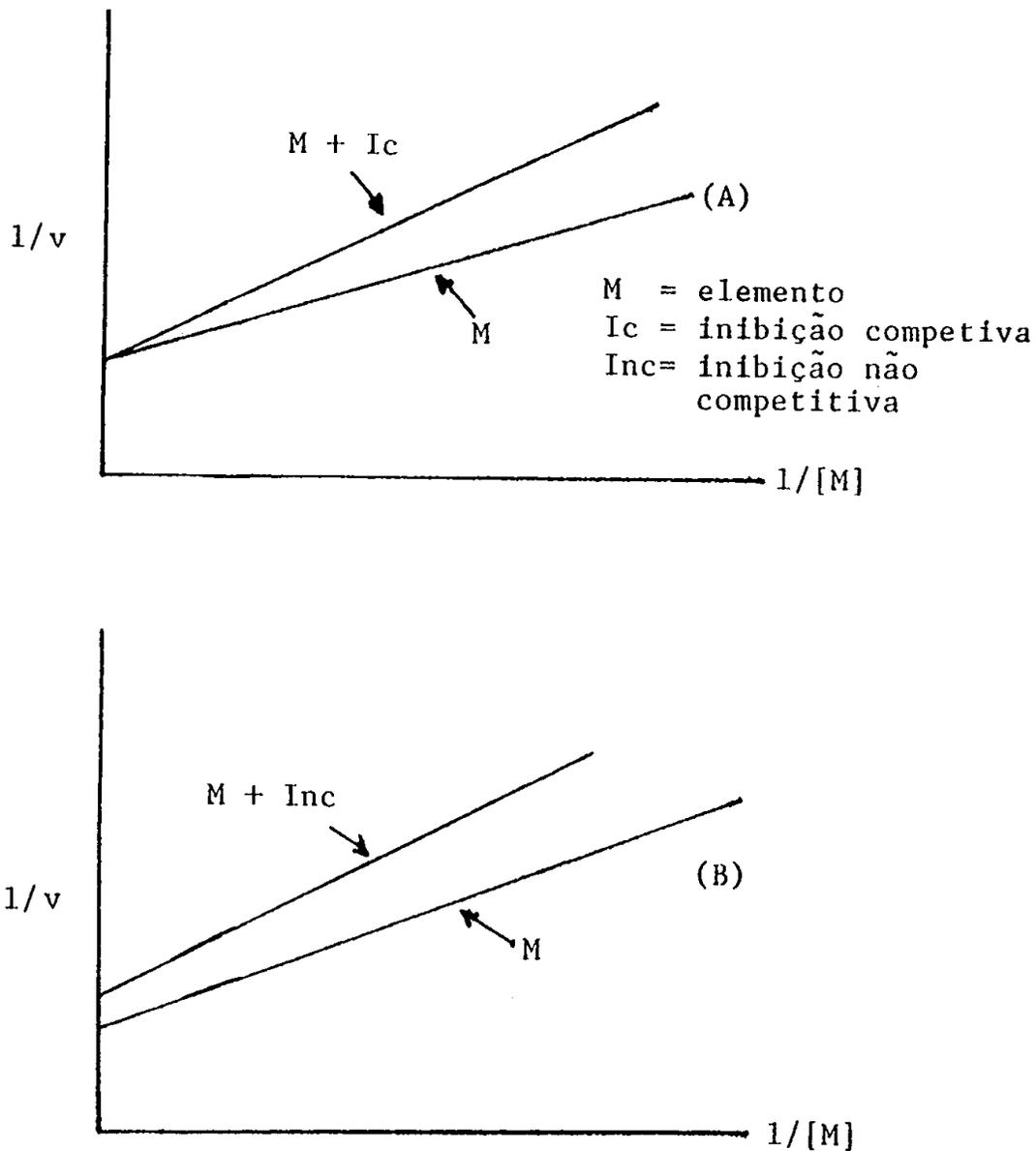
K<sub>i</sub> = constante para dissociação do complexo carregador inibidor

Não competitiva:

$$\frac{1}{v} = \left( \frac{1}{V_{max}} + \frac{K_m}{V_{max} \cdot [M]} \right) \left( 1 + \frac{[I]}{K_I} \right)$$

A representação gráfica é dada na Figura 2.19. Como se vê, havendo “inibição competitiva” o ponto de intersecção da ordenada permanece o mesmo, mudando apenas o coeficiente angular da reta. Neste caso, não há mudança no V<sub>max</sub>, pois aumentando a concentração do M o efeito do I é anulado; mas há mudança no K<sub>m</sub>. Se houver inibição “não competitiva” mudam tanto o ponto de intersecção na ordenada quanto o coeficiente angular da reta. Neste caso, há mudança no V<sub>max</sub>, pois aumentando a concentração do M o efeito do I é anulado; mas não há mudança no K<sub>m</sub>.

---



**FIGURA 2.19** Transformações de Lineweaver & Burk para inibição competitiva (A) e não competitiva (B)

Sinergismo – a presença de um dado elemento aumenta a absorção de outro; o  $Ca^{2+}$  em concentrações baixas aumenta a absorção de cátions e ânions (Efeito Viets) por seu papel na manutenção da integridade funcional das membranas, o que tem conseqüência na prática da adubação; o  $Mg^{2+}$  aumenta a absorção do fósforo.

Na Tabela 2.8. aparecem os casos mais comuns de efeitos de um íon sobre a absorção de outro.

**TABELA 2.8 Exemplos de efeitos interiônicos**

Íon	Segundo Íon Presente	Efeito do segundo sobre o primeiro
Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Inibição competitiva
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Al <sup>3+</sup>	Inibição não competitiva
K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Inibição competitiva
H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Inibição não competitiva
K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> (alta concentração)	Inibição competitiva
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Inibição competitiva
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Inibição competitiva
MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Inibição competitiva
Zn <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Inibição competitiva
Zn <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Inibição competitiva
Zn <sup>2+</sup>	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Inibição não competitiva
Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Inibição competitiva
Zn <sup>2+</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Inibição competitiva
K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> (baixa concentração)	Sinergismo
MoO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sinergismo
Cu <sup>2+</sup>	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Inibição não competitiva

Fonte: MALAVOLTA et al., (1989).

#### h. Micorrizas

Micorriza é o termo que define a associação entre fungos do solo e raízes de plantas formando uma simbiose. Maiores detalhes sobre essa simbiose são apresentados no Módulo 4 deste curso – Biologia do Solo (SIQUEIRA, 1993).

Os principais benefícios das micorrizas sobre o crescimento das plantas são devido ao aumento da superfície de absorção e maior exploração do volume do solo pelo sistema radicular das plantas. Isto se reflete em maior absorção de nutrientes, principalmente aqueles que se movem no solo por difusão, notadamente o P. Este efeito geralmente ocorre em condições sub-ótimas de P no solo (teores baixos e médios); em teores muito baixos e altos pouco efeito é observado.

Os resultados da Figura 2.20 mostram que para a mesma produção de grãos (90% da produção máxima), a micorrização da soja reduziu em 43% e 23% a dose e o nível crítico de P no solo, respectivamente.

Poucos trabalhos têm estudado o efeito da micorriza nos parâmetros cinéticos de absorção (CRESS et al., 1979; KARUNARATNE et al., 1986; FAQUIN et al. 1990 e SLVEIRA, 1990) e embora os resultados sejam ainda discordantes, parece que devido ao aumento da superfície de absorção o Vmax é maior e o Cmin é menor nas plantas micorrizadas, conferindo à mesma maior capacidade de absorção a uma dada concentração de P na solução. A Figura 2.21. mostra que tanto por unidade de peso

fresco de raiz (A) quanto por planta (B) as plantas micorrizadas, a uma mesma concentração de P na solução, apresentaram um influxo líquido médio, respectivamente, de 22 a 50% maior que as não micorrizadas.

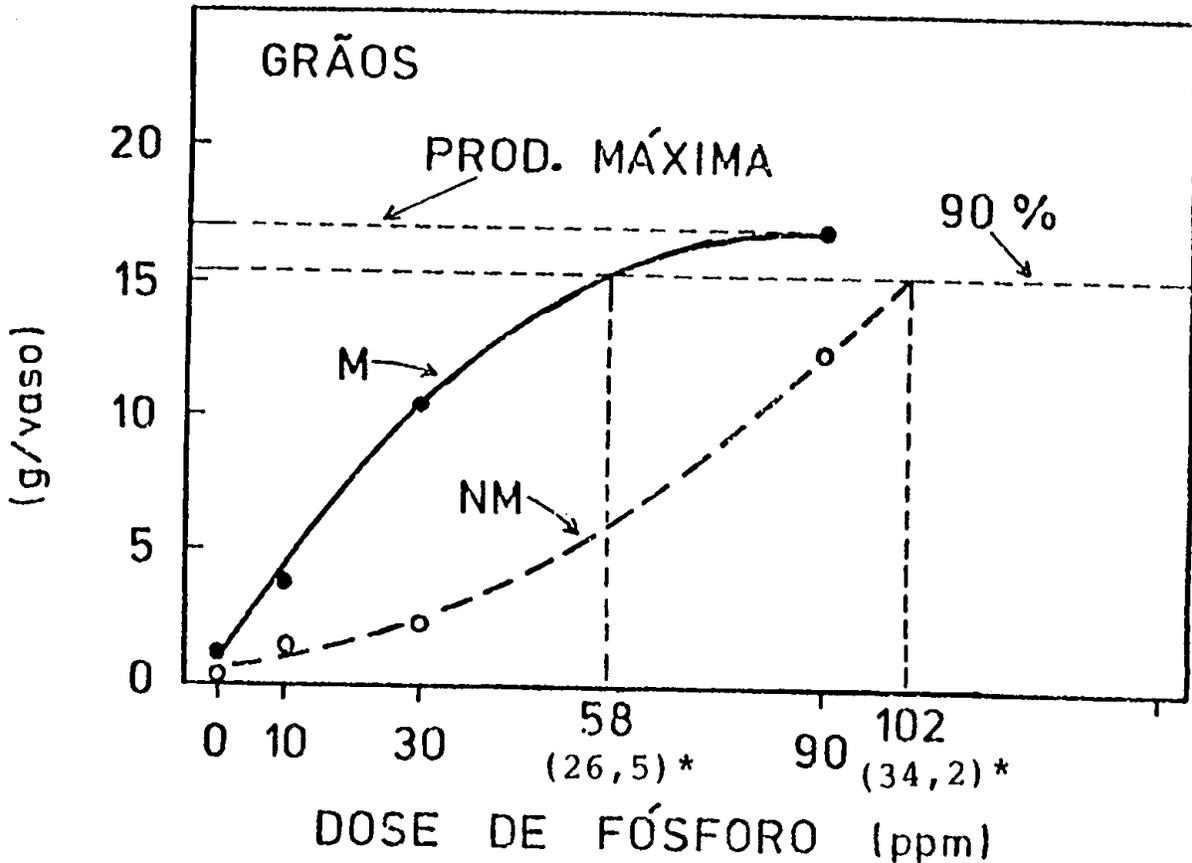
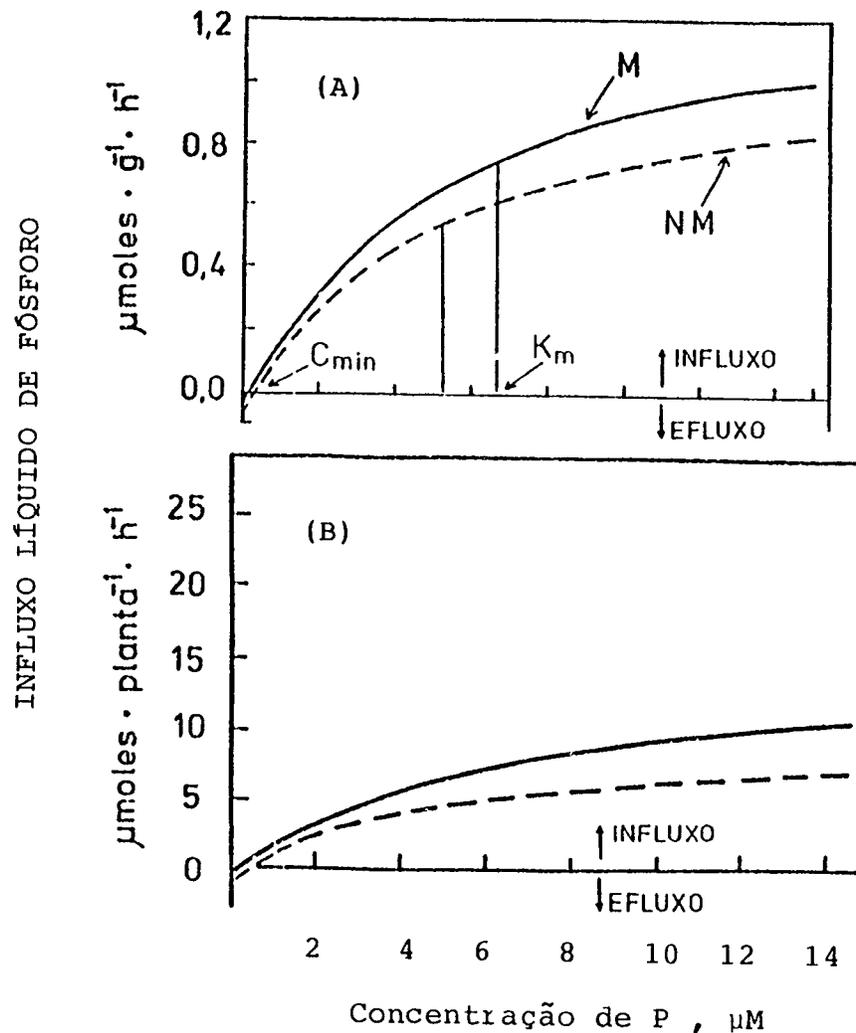


FIGURA 2.20 Doses de fósforo necessárias para produção de 90% da produção máxima de grãos pela soja micorrizada (M) e não micorrizada (NM) - \*P disponível pela resina. (FAQUIN, 1988)



**FIGURA 2.21** Influxo líquido de P: (A) por unidade de raiz fresca (gramas); (B) por planta, influenciado pela micorrização (M-micorrizada; NM-não micorrizada), em plantas de soja cultivadas em condições sub-ótimas de P. (FAQUIN, 1990)

## FATORES INTERNOS

Potencialidade genética

Embora as raízes das plantas absorvam todos os elementos (nutriente ou não) que estiverem em forma disponível na solução do solo, o processo de absorção iônica, como quase tudo na vida da planta, está sob controle genético. Como visto na introdução deste capítulo (Tabela 2.2), a absorção iônica apresenta uma certa seletividade e existem diferenças entre genótipos nas características de absorção. Há diferenças na capacidade ou na velocidade de absorção entre espécies e variedades. As diferenças manifestam-se de diversas maneiras, a saber:

- nos valores dos parâmetros cinéticos  $V_{\text{max}}$ ,  $K_m$  e  $C_{\text{min}}$  (Tabela 2.4.);

- na capacidade de solubilizar elementos na rizosfera;
- mediante excreções radiculares;
- na mudança de valência do ferro ( $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$ ), o que aumenta sua solubilidade e absorção.

#### Estado iônico interno

A relação entre a concentração externa e a taxa de absorção de um dado íon não é caracterizada por valores de Km ou Vmax. A relação é variável, dependendo em particular da concentração interna do elemento, isto é, do estado nutricional da planta. Em geral, quando a concentração interna de um íon aumenta, a taxa de absorção declina e vice-versa. De acordo com MALAVOLTA et al. (1989) a capacidade que a raiz possui para absorver M é limitada: a célula não é um “saco sem fundo”. Assim, justifica-se a técnica experimental de se omitir da solução o elemento em estudo, por um período de 40 h antes do ensaio de absorção, para a obtenção do modelo cinético (ver FAQUIN et al., 1990). Mas, em se tratando de ensaios com  $\text{N-NO}_3^-$  não é, a princípio, recomendável tal “fome”, pois o  $\text{N-NO}_3^-$  é tido por muitos como ativador (indutor) da redutase do nitrato, enzima que é tida por vários autores – embora haja grande polêmica sobre o assunto – como carregador de  $\text{N-NO}_3^-$ . Também a exclusão ou “fome” de cálcio é questionável, dado o papel do Ca sobre a integridade da membrana.

A Tabela 2.9 ilustra bem o efeito do estado iônico interno sobre a taxa inicial de absorção de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Os menores valores na taxa de absorção foram verificados, quando a solução de pré-tratamento das raízes de trigo apresentavam maiores concentrações de sulfato, visto o aumento na concentração interna do nutriente.

**TABELA 2.9 Absorção inicial de sulfato por raízes de trigo pré-tratadas com soluções de diferentes concentrações**

Pré-tratamento (mM de $\text{SO}_4^{2-}$ )	Absorção subsequente (nmol $\text{SO}_4^{2-}$ /g raiz . h)
0,50	32
0,25	40
0,05	92
0,0005	197

Fonte: Person (1969), em MARSCHNER (1986).

#### a. Nível de carboidrato

Os carboidratos são os principais substratos respiráveis como fonte de energia para o processo de absorção. Dentro de limites, a velocidade de absorção será tanto maior quanto mais alto o nível de carboidratos na raiz; é o que ilustra a Tabela 2.10.

**TABELA 2.10** Conteúdo de carboidratos na raiz e a taxa de absorção de K por raízes destacadas de cevada

Carboidrato <sup>(1)</sup> (mg glicose / g raiz fresca)	Absorção de K (nmol / g raiz fresca . h)
3,0	49
1,9	36
1,5	18
1,3	9

(1) Carboidratos totais expressos em unidades de glicose.

Fonte: Mengel (1962), em MARSCHNER (1986).

#### b. Intensidade transpiratória

O efeito da transpiração é indireto: a corrente transpiratória, que no xilema conduz M para a parte aérea, pode aumentar a tensão “puxador” o elemento contido nos espaços intercelulares e na parede celular da raiz. Além disso, havendo maior transpiração é favorecido o gradientes de umidade no solos, o que aumenta o fluxo de massa para a raiz.

#### c. Morfologia das raízes

Como mostrado na Figura 2.15, os “fatores morfológicos” – taxa de crescimento da raiz; raio médio das raízes; frequência de pêlos absorventes; comprimento de pêlos absorventes e (frequência de micorrizas) – são parâmetros considerados no estabelecimento de modelos matemáticos para explicar a absorção de nutrientes no solo. Portanto, as plantas que apresentam um sistema radicular mais desenvolvido, raízes mais finas, bem distribuídas, com maior proporção de pêlos absorventes, apresentam uma maior área absorviva e melhor exploração do volume do solo e maior capacidade de absorção. Especialmente elementos cujo contato com a raiz se faz por difusão.

## 2.2 ABSORÇÃO IÔNICA FOLIAR

### Introdução

As plantas de interesse agrícola, na sua maioria, apresentam-se divididas em três partes distintas, com adaptações específicas que possibilitam as suas funções características. As folhas, de aspecto laminar, têm por função as trocas gasosas e recepção de luz solar para a fotossíntese e transpiração. O caule, de aspecto colunar e de resistência variável tem por função, na maioria das vezes, a sustentação da parte aérea, bem como de ligação e transporte. As raízes, além da fixação do vegetal ao substrato, têm como função básica a absorção de água e dos nutrientes no solo.

Esta divisão de funções entre as partes da planta deu-se com a sua adaptação ao habitat terrestre. Embora as folhas tenham se especializado como órgão de síntese, elas não perderam a habilidade de absorver água e nutrientes, que era uma função comum no seu habitat original – o oceano. E esta capacidade das folhas em absorver água e nutrientes constitui-se a base para a aplicação foliar de nutrientes pela prática da adubação foliar, bem como de outros produtos como herbicidas, hormônios etc.

A adubação foliar é um processo em que a nutrição das plantas é feita através das partes aéreas, principalmente das folhas. Contudo, não deve ser encarada como substitutiva da adubação radicular, principalmente para os macronutrientes, o que exigiria um grande número de aplicações para atender às exigências das plantas.

Em seu breve resumo histórico, MALAVOLTA (1980) relata que as primeiras informações sobre a adubação foliar datam do século XIX e que, no Brasil, ao que parece, os primeiros trabalhos sobre absorção foliar de nutrientes, tanto em condições controladas como em condições de campo, surgiram no final da década de 1950 e início de 1960, realizados com o cafeeiro na ESALQ-USP, Piracicaba-SP e no IAC-Campinas.

O principal objetivo de se estudar a absorção foliar está no uso eficiente da adubação foliar. Hoje, a adubação foliar é utilizada no mundo inteiro em diferentes culturas e tem como interesse prático, dentre outros:

Corrigir deficiências eventuais dentro do ciclo da planta;

Fornecimento de micronutrientes, principalmente em culturas perenes, onde no solo apresenta menor eficiência;

Aumentar a eficiência de aproveitamento dos adubos;

Fornecimento de nutrientes em cobertura, quando há impossibilidade de aplicação mecânica no solo (Ex.: N em cana de açúcar com 4-6 meses – por avião);

Fornecimento de cálcio diretamente aos frutos, evitando desordens nutricionais (Ex.: maçã e tomate);

Distribuição mais uniforme dos adultos.

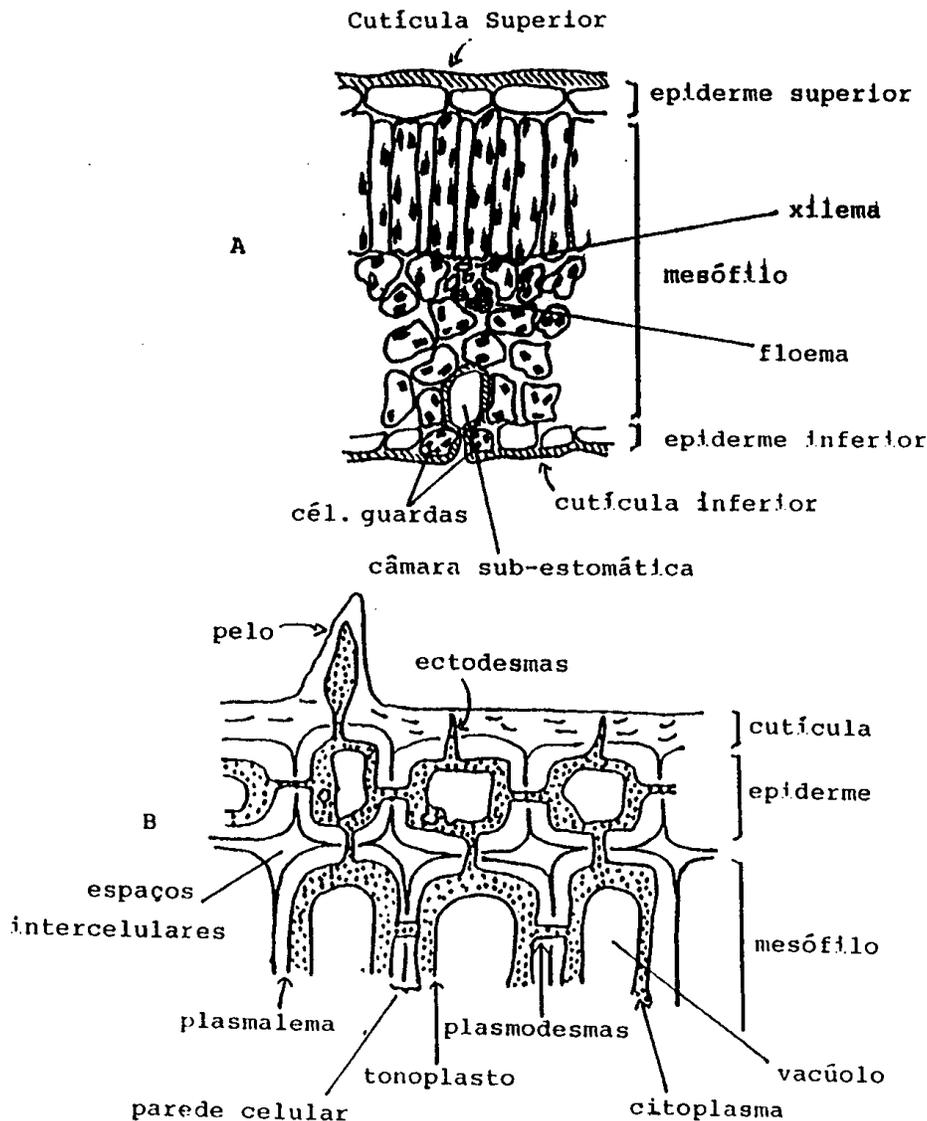
#### Aspectos Anatômicos

A Figura 2.22. ilustra a anatomia foliar: (A) corte transversal da lâmina e (B) detalhe da cutícula no revestimento externo da folha. Observa-se (A) que, tanto a superfície superior quanto a inferior, são revestidas externamente por uma camada cerosa, hidrorrepelente, a cutícula – que apresenta na sua composição a cutina, pectina, hemicelulose, ácidos graxos e ceras. A cutícula, em geral, é mais espessa na face adaxial que na abaxial. Nesta face, predominantemente, aparecem os estômatos, também revestidos internamente pela cutícula. Os estômatos aumentam sobremaneira a superfície para o contato com a solução.

Assim, a cutícula constitui-se na primeira barreira à penetração de soluções provenientes de aplicações foliares, devendo estas soluções atravessar a cutícula,

penetrando no apoplasto e, posteriormente, atravessar a plasmalema, que é a segunda barreira, para então atingir o simplasto e serem utilizadas ou transportadas para outras células ou órgãos. As células são interligadas formando o simplasto, através dos plasmodesmas (B). Os ectodesmas são importantes vias de acesso dos nutrientes absorvidos através da cutícula. Os tricomas (pêlos) interferem na molhabilidade da superfície foliar.

Ao contrário do que se pensava, a cutícula não é uma camada contínua; ela apresenta microcanais e rupturas que permitem a passagem de soluções.



**FIGURA 2.22** Aspectos da anatomia foliar: (A) corte transversal da lâmina; (B) detalhe da cutícula revestindo a epiderme

### Vias e Mecanismos da Absorção Foliar

Com a introdução dos radioisótopos nos estudos da nutrição mineral das plantas foi possível esclarecer vários aspectos da absorção foliar dos nutrientes.

A absorção foliar é obrigatoriamente cuticular, devido ao revestimento da superfície foliar, inclusive a câmara sub-estomática, pela cutícula. Estudos efetuados com a cutícula foliar isolada enzimaticamente mostraram que a mesma é permeável à difusão de cátions e ânions, mais no sentido de fora para dentro (influxo) do que o contrário (efluxo). Observou-se também, que a passagem da uréia através da cutícula é algumas vezes mais rápida que a dos outros elementos ( $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) e que aumentou com a concentração, mas não proporcionalmente; o que sugere que a passagem da uréia pela cutícula não seja por difusão simples, mas por “difusão facilitada”. MALAVOLTA (1980) explica admitindo-se que a uréia possa romper ligações químicas entre os componentes da cutícula, tornando-a mais permeável. Parece que a uréia também aumenta a permeabilidade da própria membrana celular (plasmalema e tonoplasto).

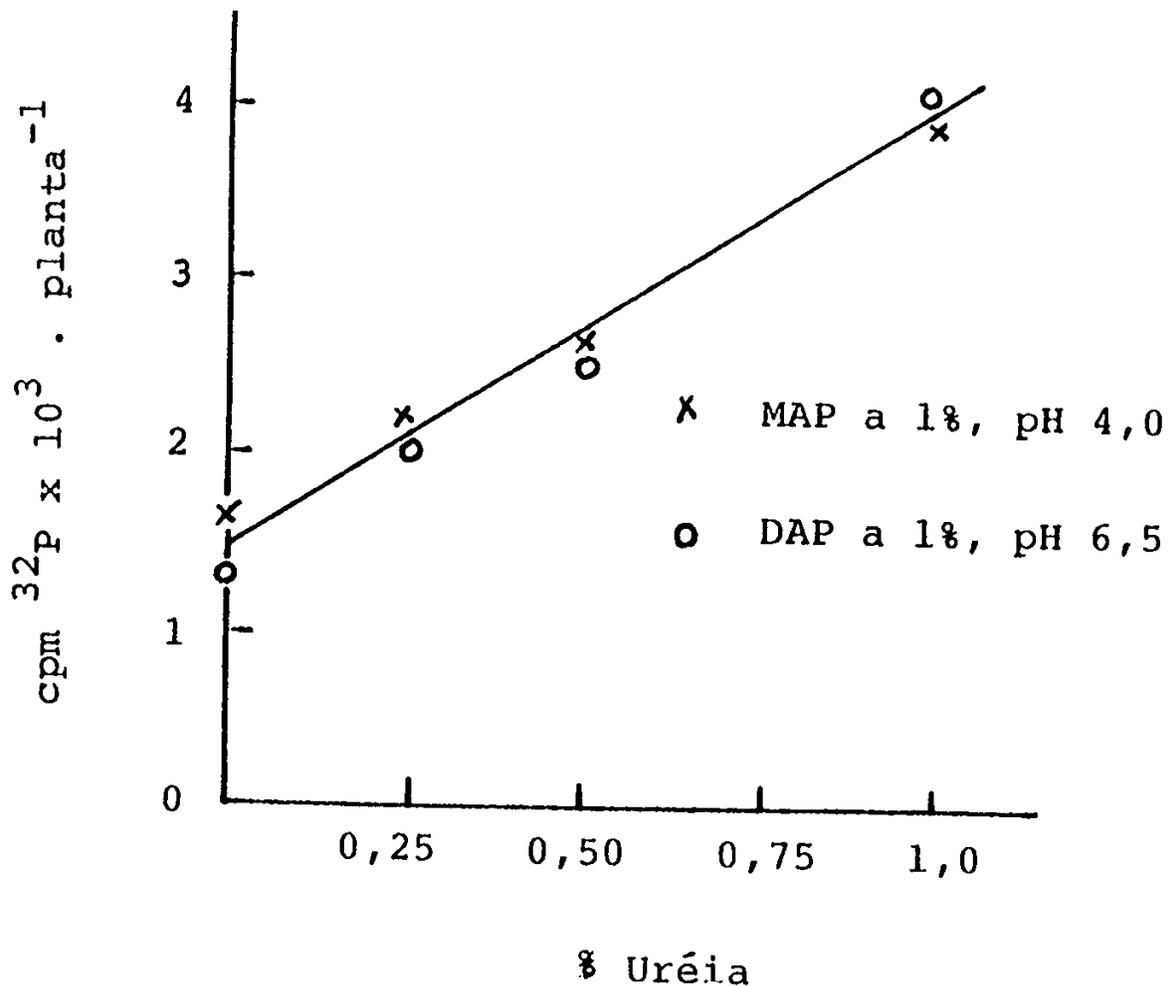
Assim, esta característica torna a uréia muito importante na prática da adubação foliar, pois além de aumentar a sua própria absorção, aumenta também a dos outros íons presentes na solução, como mostra a Figura 2.23.; nas concentrações de uréia utilizadas, há um efeito linear na absorção do fósforo das duas fontes.

Em geral, se aceita que a absorção foliar de nutrientes, tal como acontece com a radicular, se processa em duas etapas:

Passiva – consiste num processo não metabólico, onde o nutriente aplicado na superfície foliar atravessa a cutícula ocupando o ELA (Espaço Livre Aparente), formado pela parede celular, espaços intercelulares e superfície externa do plasmalema (ver Figura 2.22.B). Seria a ocupação do apoplasto foliar.

Ativa – constitui-se num processo metabólico lento; dá-se contra um gradiente de concentração e exige o fornecimento de energia (ATP) para vencer as membranas plasmáticas. Seria a ocupação do simplasto foliar.

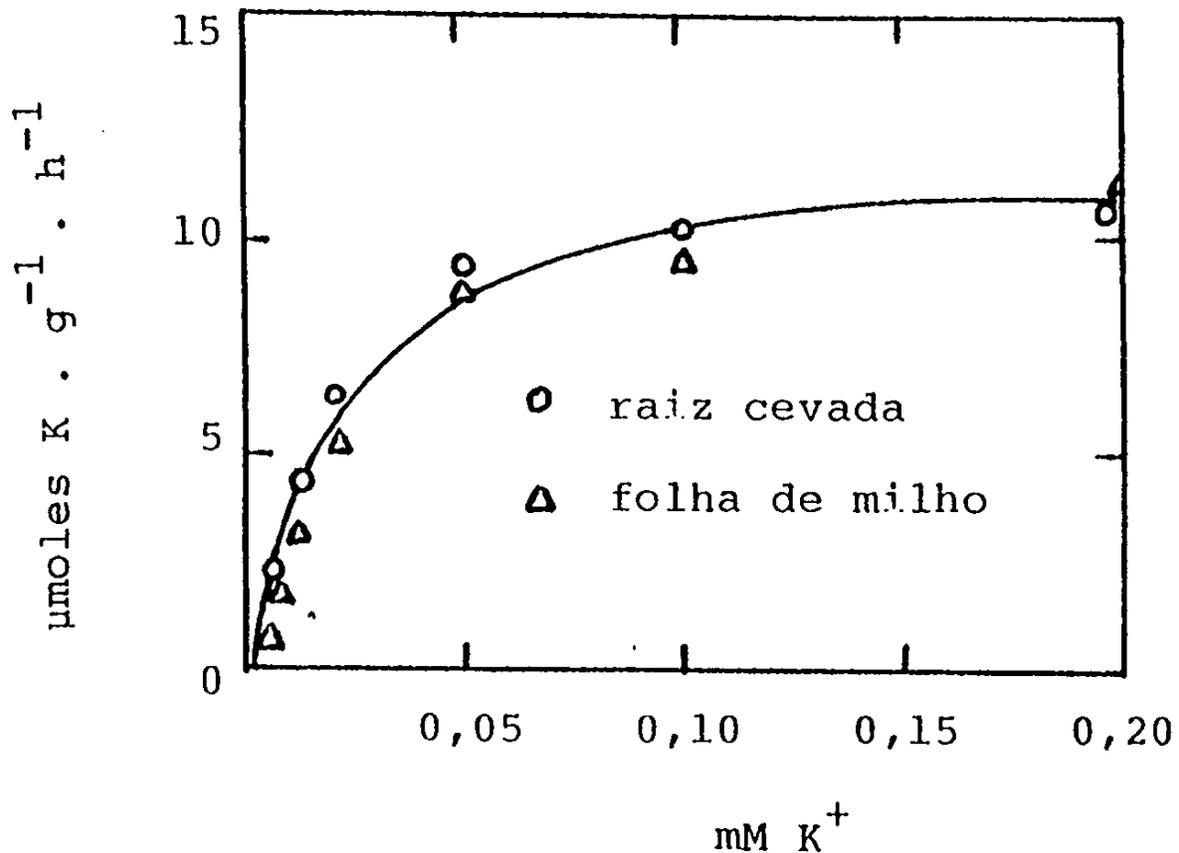
---



**FIGURA 2.23** Efeito da uréia na absorção foliar de fosfatos de amônio pelo feijoeiro. (MALAVOLTA, 1980)

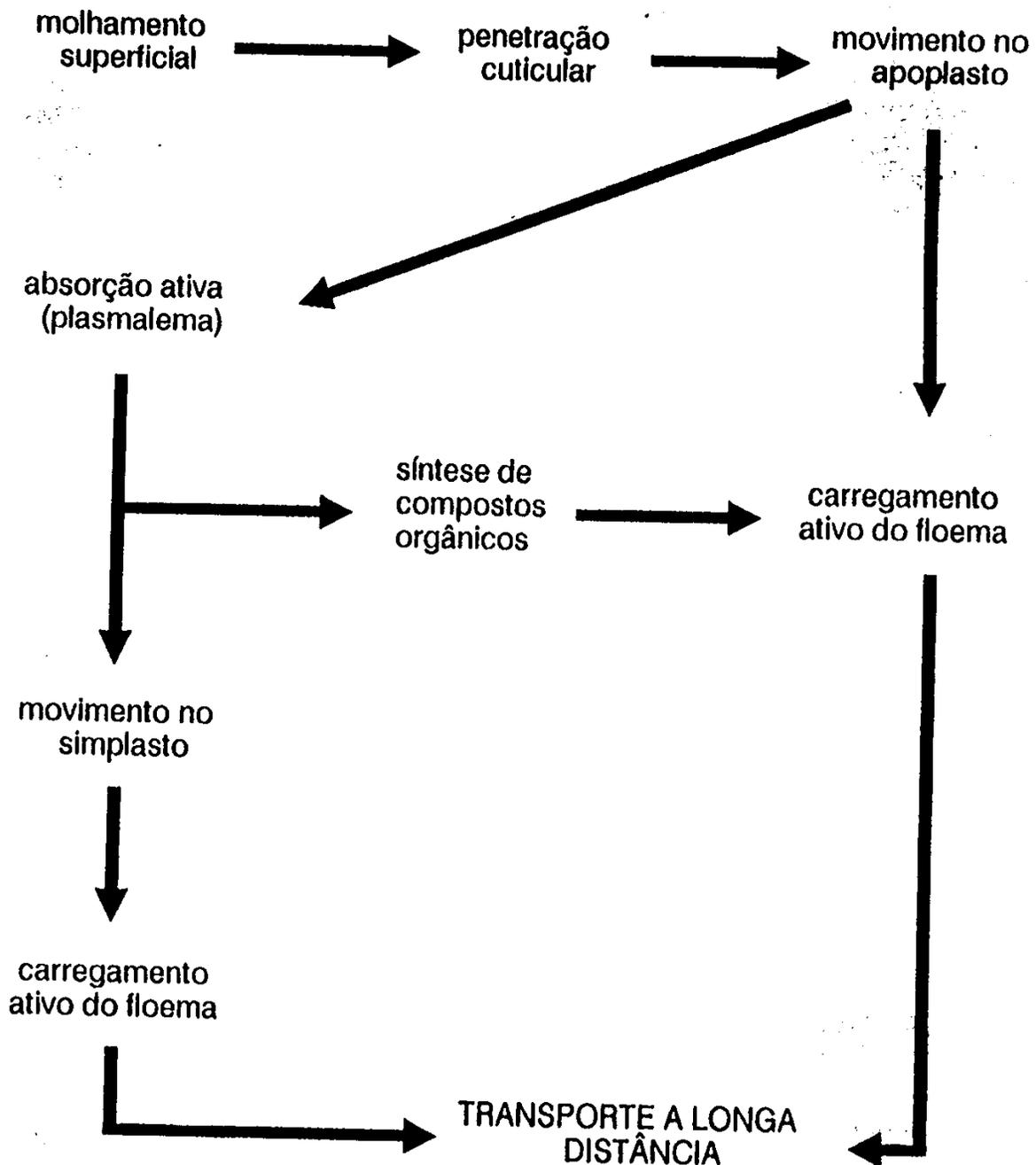
Está bem demonstrado que duas são as fontes possíveis de energia (ATP) para a absorção ativa – a fosforilação oxidativa (respiração) das mitocôndrias e a fotofosforilação ou fosforilação fotossintética (ciclística e não ciclística), que ocorre nos cloroplastos iluminados. A participação da primeira foi demonstrada com a utilização de inibidores respiratórios e da segunda é sugerida pela diminuição na absorção quando as folhas permanecem no escuro.

Tal como ocorre na absorção radicular (item 2.1.3), a participação de carregadores no processo ativo da absorção foliar é sugerida. Resultados experimentais de aplicação da cinética enzimática conduziram a gráficos como o da Figura 2.24, com a obtenção dos mesmos valores de  $K_m$  e  $V_{max}$  para a absorção de  $\text{K}^+$  tanto para raízes de cevada quanto para folha de milho.



**FIGURA 2.24** Velocidade de absorção de K por raízes de cevada e folha do milho. A curva é um gráfico da equação de Michaelis-Menten ( $K_m = 0,022 \text{ mM}$ ;  $V_{\text{max}} = 12 \mu\text{moles/g tecido fresco} \cdot \text{h}$ ) (EPSTEIN, 1975).

Contrariamente ao que ocorre nas raízes, o elemento absorvido pelas folhas pode atingir o floema tanto pelo apoplasto – por difusão pelas paredes e espaços intercelulares – quanto pelo simplasto, através das comunicações citoplasmáticas, os plasmodesmas. O transporte a longa distância para outros órgãos, quando ocorre, tem lugar principalmente pelo floema, o processo exigindo energia. A Figura 2.25 resume bem os possíveis caminhos que os solutos percorrem no processo de absorção foliar até o transporte a longa distância, quando ocorre.



**FIGURA 2.25** Possíveis caminhos dos solutos através da folha. (Modificado de HANES & GOH, 1977, *Sci. Hort.*, Z(4):291-302).

#### 2.2.4 Velocidade de absorção e mobilidade dos nutrientes na floema

A velocidade de absorção foliar varia de nutriente para nutriente e de planta para planta, considerando todos os outros fatores em igualdade de condições. A Tabela 2.11 mostra as velocidades de absorção foliar de nutrientes, baseadas no tempo necessário para a absorção de 50% do total aplicado às folhas, dados reunidos por Wittwer (1964).

**TABELA 2.11 Velocidade de absorção de nutrientes aplicados às folhas**

Nutriente	Tempo para 50% de absorção (*)
Nitrogênio (uréia)	½ - 36 horas
Fósforo	01 – 15 dias
Potássio	01 – 04 dias
Cálcio	10 – 96 horas
Magnésio	10 - 24 horas
Enxofre	05 – 10 dias
Cloro	01 – 04 dias
Ferro	10 – 20 dias
Manganês	01 – 02 dias
Molibdênio	10 – 20 dias
Zinco	01 – 02 dias

(\*) em função da planta considerada.

A mobilidade, ou seja, o transporte dos nutrientes das folhas para outros órgãos pelo floema, também varia de elemento para elemento, sendo os mesmos classificados desde altamente móveis até imóveis, como o Ca e B (Tabela 2.12.); nestes casos a aplicação foliar do elemento não dá resultados tão satisfatórios quanto a aplicação no solo. De acordo com MALAVOLTA (1980), da velocidade de absorção e da mobilidade depende, em grande parte, a possibilidade do fornecimento foliar de nutrientes à planta na prática da “adubação foliar”.

**TABELA 2.12 Mobilidade comparada dos nutrientes aplicados nas folhas. Em cada grupo os elementos aparecem em ordem decrescente**

Altamente Móveis	Móveis	Parcialmente Imóveis	Imóveis
Móveis		Imóveis	
Nitrogênio	Fósforo	Zinco	Boro
Potássio	Cloro	Cobre	Cálcio
Sódio	Enxofre	Ferro	
		Molibdênio	

Fonte: MALAVOLTA (1980).

### 2.2.5 Fatores que afetam a absorção foliar

A absorção foliar é influenciada por uma série de fatores, alguns externos, ligados ao meio, e outros internos, ligados à própria planta, que afetam, portanto, a eficiência da adubação foliar.

## FATORES EXTERNOS

### a. Molhabilidade da superfície foliar

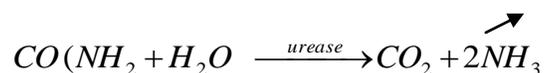
Para que a penetração do nutriente aconteça é necessário que a superfície foliar seja molhada. A capacidade da solução molhar a superfície é função do ângulo de contato entre ambas, o que depende da tensão superficial da gota e da natureza da superfície, a qual, devido à própria composição da cutícula, apresenta características hidrorrepelentes. O advento dos agentes molhantes ou adesivos (surfactantes) foi um grande avanço na prática da aplicação de produtos via foliar. Estes produtos têm como objetivo principal, romper a tensão superficial da gotícula e da cutícula, promovendo o molhamento da superfície foliar; reduzem a evaporação da água da solução e apresentam um grande poder de penetração, principalmente na câmara sub-estomática, favorecendo sobremaneira a absorção de nutrientes e reguladores vegetais pelo uso destes produtos.

### b. Temperatura e umidade relativa do ar

A água da solução é o veículo para a penetração dos nutrientes na folha. A temperatura e a umidade relativa do ar afetam a velocidade de secamento da solução aplicada e, portanto, a possibilidade de estabelecimento de uma película líquida na superfície da folha. A combinação destas duas variáveis, contribuindo para a diminuição do gradiente entre as pressões de vapor na folha e no ar ambiente favorece a absorção. Portanto, umidade relativa alta e temperaturas amenas favorecem a absorção foliar, devido a uma menor evaporação da água da solução, mantendo a cutícula sempre hidratada; deve-se ter presente, porém, que a própria transpiração favorece a manutenção da umidade de cutícula, aspecto tão importante quanto a água da própria solução. Na prática, portanto, as condições mais favoráveis para a aplicação foliar de elementos seria pela manhã e no final da tarde. Nas horas mais quentes, a absorção seria menor, não só pelo secamento da solução, mas também pelo murchamento das folhas, o que leva ao fechamento dos estômatos, importante via de acesso dos nutrientes no processo.

### c. Composição da solução

Como se viu na Tabela 2.11., os diferentes nutrientes apresentam velocidade também diferentes de absorção. Por outro lado, a absorção de um dado elemento pode ser afetada (aumentada ou diminuída) por outros fatores da própria solução: a velocidade de absorção de N varia em função da sua forma – o N-amídico (uréia) > N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. A alta velocidade de absorção da uréia pode provocar toxidez à planta, devido à liberação de altas concentrações de amônia (NH<sub>3</sub>) pela atividade da urease da folha.



A tolerância das culturas à uréia varia muito, como se vê na Tabela 2.13. Verificou-se que o dano causado pela uréia em folhas de tomateiro foi reduzido pela presença de  $MgSO_4$  na solução, provavelmente, devido a uma menor absorção. A adição de sacarose à solução também reduz a toxicidade da uréia (Tabela 2.14), possivelmente por retardar a absorção da uréia ou oferecer esqueletos carbônicos para a assimilação da amônia, diminuindo sua concentração no tecido.

**TABELA 2.13 Tolerância das culturas à uréia aplicada nas folhas (alto volume)**

Cultura	Tolerância (Kg uréia/100 l d'água)
Hortaliças	
Pepino, feijão, tomateiro, milho doce	0,5-0,75
Aipo, cebola, batata, cenoura	1,9-2,5
Frutíferas	
Macieira, videira, moranguinho	0,5-0,75
Pessegueiro, ameixeira	1,25-2,50
Extensivas	
Beterraba, alfafa, milho	1,25-2,50
Trigo, gramíneas forrageiras	2,50-12,50
Outras tropicais	
Fumo, citrus, cacauzeiro	0,6-1,2
Cana-de-açúcar, bananeira, mangueira, chá, cafeeiro	1,2-3,0
Algodoeiro, lúpulo	2,5-6,2
Abacaxi	3,1-12,5

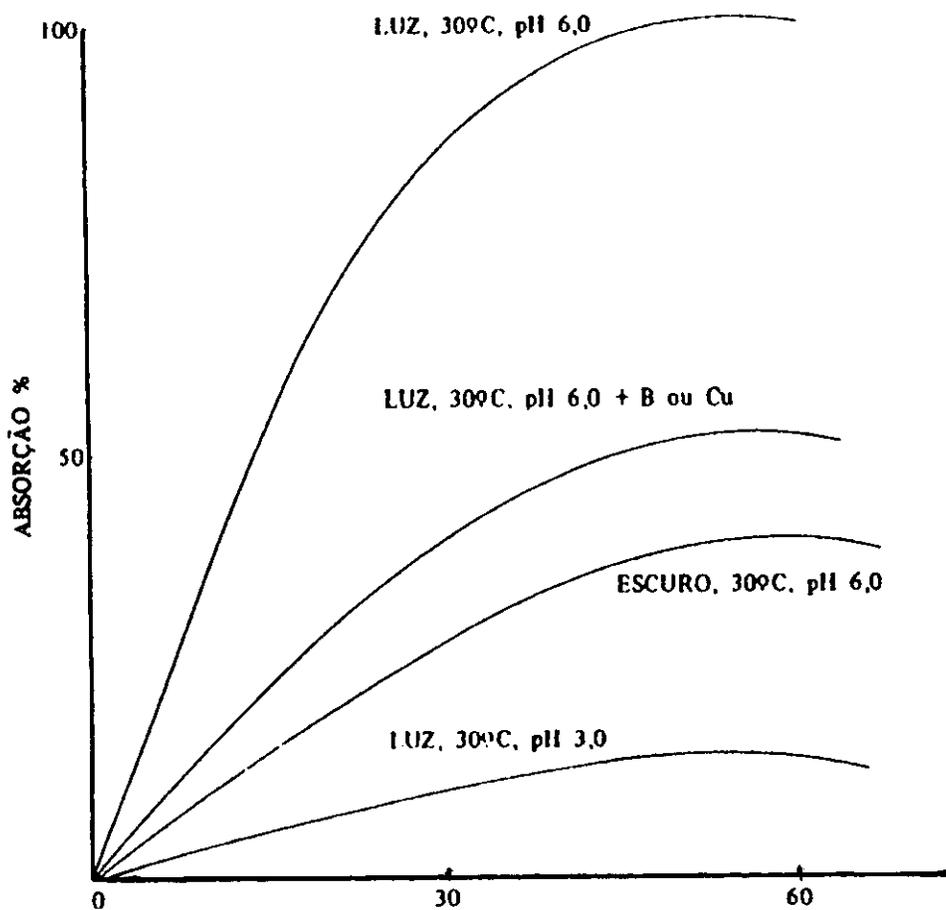
Fonte: MALAVOLTA (1981).

**TABELA 2.14 Efeito da aplicação foliar de uréia e sacarose sobre os danos em folhas de soja**

Tratamento ( $\mu g/cm^2$ )		Danos (% da área total da folha)
Uréia	Sacarose	
159	0	0
478	0	25
478	909	15
478	2726	3

Fonte: Barel & Black (1979), em MARSCHNER (1986).

Os efeitos interiônicos (inibição, sinergismo) também ocorrem na absorção foliar. A Figura 2,26 mostra, por exemplo, que a presença de cobre ou de boro reduz em 50% a absorção do Zn aplicado às folhas do cafeeiro; no caso do cobre, trata-se de inibição competitiva que pode ser corrigida aumentando-se a concentração do Zn na solução de 0,5% para 0,8 ou 1% da concentração de sulfato de zinco. A inibição causada pelo B é, entretanto, não competitiva. O  $H^+$  inibe competitivamente a absorção de cátions; é o que mostra a figura que, no pH 3,0, a absorção de Zn é bem menor da conseguida no pH 6,0. Não pode-se esquecer que, como visto, o pH baixo promove alterações na permeabilidade da membrana plasmática, podendo ocorrer inclusive o “vazamento” de íons já absorvidos. Por sua vez, a Figura 2.23 indica pouco ou nenhum efeito do pH das duas soluções de fosfato de amônio.



**FIGURA 2.26** Efeito de diferentes fatores na absorção foliar de Zn pelo cafeeiro. (BLANCO, 1970. ESALQ-USP, Piracicaba, Tese Doutorado)

O íon acompanhante do elemento no sal pode também afetar a sua velocidade de absorção, como mostra a Tabela 2.15. O cloreto, como componente da fonte ou na forma de KCl, promoveu as maiores absorções de Zn pelas folhas do cafeeiro. Na prática, a

presença de KCl em soluções de aplicação foliar é comum devido a este fato.

**TABELA 2.15 Efeito da fonte sobre a absorção de zinco de cafeeiro**

Fonte	ppm Zn nas folhas
Testemunha	13
Sulfato de zinco	28
Cloreto de zinco	56
Nitrato de zinco	43
Quelato-Zn (EDTA)	24
Sulfato de zinco + KCl	39

Dose-0,325 g Zn/pl por aplicação; folhas analisadas 60 dias após a 2ª aplicação.

Fonte: GARCIA & SALGADO (1981).

#### d. Luz

Embora haja a exceção de algumas suculentas da família das crassuláceas, que habitam ambientes áridos e quentes, a grande maioria das plantas abre seus estômatos na luz e os fecha no escuro. Tem sido sugerido também que a luz apresenta um efeito na permeabilidade da plasmalema.

Como a absorção ativa constitui-se num processo metabólico (exige, portanto, energia fornecida pelo ATP), que no caso da absorção foliar, além da fosforilação oxidativa (respiração nos mitocôndrios), existe uma fonte adicional de energia que é a fosforilação fotossintética (cloroplasto iluminados). A Tabela 2.15 mostra como a fotofosforilação (luz/escuro) e a fosforilação oxidativa (2,4-DNP-inibidor desta) afetam a absorção foliar, mas neste caso, além da fonte de energia, a abertura estomática deve estar envolvida.

**TABELA 2.16 Efeitos da luz e do inibidor 2,4-DNP sobre a absorção de potássio por segmentos de folha de milho**

Tratamento	Absorção de K ( $\mu\text{mol/g} \cdot \text{h}$ )		% Inibição
	Luz	Escuro	
Testemunha	3,7	2,3	38
2,4-DNP ( $10^{-5}\text{M}$ )	2,0	0,2	90
% inibição	46	91	

Fonte: Rains (1968), em MARCHNER (1986).

## FATORES INTERNOS

### Superfície foliar

Cutículas finas, alta frequência de estômatos, um elevado número de ectodesmas favorecem a absorção iônica; os opostos dificultam. Admite-se que os tricomas (pêlos), por aumentar a superfície de contato, também possam ajudar no processo.

A página inferior da folha, devido à presença de cutícula mais fina e predominância dos estômatos, de maneira geral, apresenta maior absorção da solução aplicada. Por isso, a distribuição uniforme da solução, atingindo também a face abaxial das folhas, é recomendada na prática da adubação foliar.

O grau de hidratação da folha tem grande importância para absorção de nutrientes, pois as cutículas bem hidratadas são mais permeáveis à solução. As cutículas desidratadas das folhas murchas são bastante impermeáveis.

### Idade da folha

A absorção de nutrientes da solução é maior nas folhas novas do que nas velhas. Nestas, parece que o aumento da espessura da cutícula aumenta mais a resistência à penetração da solução. Além disso, as folhas mais novas apresentam maior atividade metabólica, consumindo mais rapidamente os nutrientes nos processos de síntese, reduzindo assim o seu estado iônico interno.

### Estado iônico interno

Como visto no caso da absorção iônica pelas raízes (ver Fatores Internos), a capacidade de absorção foliar, em igualdade de condições, pode ser variável, dependendo da concentração interna do elemento, isto é, do estado nutricional da planta. É o que pode ser visto na Tabela 2.16, que mostra uma taxa de absorção foliar de fósforo duas vezes maior na planta deficiente em P do que naquela bem nutrida (Testemunha) que recebeu o nutriente adequadamente via radicular. Este comportamento foi também acompanhado pela maior translocação (transporte) do P absorvido pela folha tratada, para outros órgãos, principalmente para as raízes, dificultando, portanto, o acúmulo do nutriente na folha e aumentando a absorção.

---

**TABELA 2.17 Absorção foliar e translocação do  $^{32}\text{P}$  por plantas de cevada nutridas e deficientes no nutriente<sup>(1)</sup>**

Parâmetro	Absorção e Translocação	
	(μmol P/g mat. Seca . h)	
	Testemunha	Deficientes em P
Absorção pela folha tratada	5,29	9,92
Translocação da folha tratada	2,00	5,96
Translocação para a raiz	0,63	4,38

<sup>(1)</sup>  $^{32}\text{P}$  aplicado em folha madura. Duração do experimento 3 dias.

Fonte: Clarkson & Scattergood (1982), em MARSCHNER (1986).

### Adubação Foliar

No que respeita a insumos, os corretivos e fertilizantes constituem-se em componentes essenciais para o aumento da produção e produtividade agrícola.

Dentre as várias maneiras de se fornecer nutrientes às plantas, o valor da adubação foliar pode ser descartado, sendo ela, muitas vezes a alternativa mais eficiente para a solução de problemas específicos e/ou complemento de uma adubação racional.

Um grande aumento no consumo de adubos foliares nas décadas de 70 e 80 foi observado no Brasil, principalmente daqueles comercializados na forma líquida, com formulação NPK + micronutrientes ou apenas micronutrientes. Mais de duas centenas de formulações são encontradas no mercado, fabricadas por uma série de indústrias.

A despeito deste grande aumento no consumo de adubos foliares no país, não se encontram na literatura brasileira pesquisas conclusivas que dêem um respaldo agrônomo e econômico, que justifique o aumento do uso desta prática se adiantasse à pesquisa. Fazendo-se uma revisão nos Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Adubação Foliar (ROSOLEM & BOARETTO, 1987) conclui-se que as recomendações de uso são feitas de forma empírica, sem um embasamento experimental e, portanto, supõe-se que não surtam, na maioria das vezes, o efeito esperado (ou divulgado) de aumentos de produção.

### Usos da Adubação Foliar

Tem sido proposta ou utilizada a adubação foliar sob determinadas situações ou condições, que precisam portanto ser definidas: adubação foliar corretiva; adubação foliar substitutiva; adubação foliar complementar e adubação foliar suplementar.

A “adubação foliar corretiva” tem como objetivo corrigir deficiências nutricionais que possam eventualmente ocorrer durante o ciclo da planta (adubação de salvação). Nesta

está um dos empregos mais importantes da adubação foliar, visto que a resposta das plantas a esta prática rápida, sendo possível corrigir as deficiências durante a fase e crescimento. Via solo, a resposta seria mais lenta e com certeza as perdas em produção bem maiores.

É possível usar a adubação foliar “preventiva” quando se sabe que um determinado nutriente (na maioria dos casos micronutrientes) é deficiente no solo e que a sua aplicação neste não é eficiente.

Não se deve pensar que pela “adubação foliar substitutiva” se possa substituir o fornecimento de nutrientes via solo, embora admitam alguns autores que, em casos isolados, é possível atender às exigências nutricionais da planta, via exclusivamente foliar como, por exemplo na floricultura. Para a grande maioria das culturas seria, portanto, muito difícil esta substituição, especialmente para os macronutrientes, devido à necessidade de grande número de aplicações, o que tornaria o processo antieconômico.

Por exemplo, segundo MALAVOLTA (1981) uma produção de laranja de 21 t/ha (média nacional) implica na aplicação de 150 Kg de N, 50 Kg de  $P_2O_5$  e 180 Kg de  $K_2O$  / ha. Baseando-se nestes dados e admitindo-se 200 plantas/ha, cada planta necessita de 750 g N, 250 g de  $P_2O_5$  e 900 g de  $K_2O$ , equivalente a 1.550 g de uréia, 500 g de MAP e 1.500 g de KCl. Para fornecê-los seriam necessárias 71 aplicações de 400 litros/ha na concentração de 2,5% na solução. Embora a eficiência da adubação foliar seja maior que a adubação via solo, reduzindo as perdas por lixiviação, volatilização, fixação, o número de aplicações seria bastante elevado, restando saber na prática se isto seria economicamente viável.

Na “adubação foliar complementar” uma parte dos adubos é aplicada via solo, convencionalmente, sendo completada pela aplicação foliar. É comum este tipo de adubação em culturas perenes, onde os macronutrientes são aplicados ao solo e os micronutrientes necessários, via foliar em épocas de maior exigência. Para o Boro, devido sua imobilidade no floema, é discutível sua aplicação através das folhas. Uma possibilidade a ser melhor explorada é a substituição da adubação nitrogenada e potássica de cobertura pela adubação foliar.

CAMARGO & SILVA (1975) apresentam uma sugestão de adubação complementar, na qual a adubação convencional via solo seria reduzida em 20% e complementada por três pulverizações foliares, de acordo com as fases de desenvolvimento da cultura. Neste sistema há três formulações básicas: nitrogenada, fosfatada e potássica, cada uma delas contendo os três macronutrientes primários, mas em proporções diferentes, de tal forma que a primeira seja rica em N (aplicada na fase de crescimento ou vegetação); a segunda em P (aplicada na fase de florescimento) e a terceira em K (aplicada na fase de frutificação). Isto porque, segundo SILVA (1981) para cada fase há um nutriente que é exigido em maiores proporções. As formulações dos adubos sugeridas são: (a) fase de crescimento ou vegetação: 25-05-05; 30-10-10; 13-04-09; 30-00-00; etc; (b) fase de floração: 15-30-15; 08-16-08; 10-50-10; 10-20-10; etc; (c) fase de frutificação: 15-15-30;

---

05-05-15; 20-05-30; etc. Entretanto, a adubação foliar com diferentes formulações para cada estágio de desenvolvimento da cultura, carece ainda de fundamento e experimentação.

A adubação foliar complementar (ou preventiva) com cálcio, tem sido utilizada rotineiramente em algumas culturas, cuja deficiência promove distúrbios fisiológicos nos frutos (lesões), citando como exemplo o tomate (podridão apical) e maçã (“bitter pit”). Neste caso, as pulverizações com cálcio têm por objetivo principal atingir diretamente os frutos – visto que a translocação para os frutos do Ca absorvido pelas folhas é praticamente desprezível – possibilitando um melhor controle dos distúrbios que ocorrem em pré e pós-colheita.

Em macieira, o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) na concentração de 0,5 a 0,7% tem sido recomendado, em pulverizações quinzenais e a alto volume, iniciando-se quando os frutos têm aproximadamente 1 cm de diâmetro, continuando até próximo à colheita. Em tomateiro, a mesma fonte na concentração de 0,6% a alto volume é recomendada, em pulverizações corretivas de 3 em 3 dias e preventivas de 7 em 7 dias, a partir do florescimento das plantas, utilizando espalhante adesivo.

No caso da “adubação foliar suplementar”, o uso da técnica seria feito com um investimento a mais, em culturas de alta produtividade, portanto, sem carência nutricional, pois a adubação no solo seria normal. Nestas condições, a adubação foliar teria a finalidade de garantir a produção pendente em períodos de estresse nutricional. Os resultados neste caso também têm sido bastante contraditórios, faltando maiores informações sobre a sua viabilidade técnica e econômica.

Assim, o consenso sobre a adubação foliar como um método de fornecimento de nutrientes às plantas na prática agrícola, pode ser resumido do seguinte modo:

- macronutrientes – para as culturas extensivas, a adubação foliar seria um complemento (e não substituto) da adubação feita no solo, principalmente para N, P e K. A foliar teria seu lugar na correção de deficiências eventuais, como cobertura de N e K e quando a foliar for o único recurso. Em culturas de alto rendimento e ciclo curto, como a floricultura, admite-se o fornecimento dos macronutrientes totalmente via foliar, como substituto da radicular.
- micronutrientes – devido às menores exigências, as necessidades das plantas são supridas em poucas pulverizações. Assim, esta prática é bastante utilizada em plantas perenes, sendo neste caso, substitutiva à adubação no solo.

Cálcio e Boro – ambos não são redistribuídos na planta, portanto, exigem um suprimento constante, que é feito eficientemente via solo. Sendo imóvel no floema, a aplicação foliar apresenta pequena eficiência, visto que a translocação da folha para outros órgãos é praticamente nula. Assim, recomenda-se suas aplicações via solo e a

---

foliar seria apenas como corretiva ou preventiva, especialmente em culturas como o tomateiro e macieira. Neste caso, as pulverizações tem por objetivo atingir diretamente os frutos.

### Prática da Adubação Foliar

Os produtos usados na adubação foliar podem ser simples (contém apenas um elemento principal, macro ou micronutriente) ou produtos mistos (contém dois ou mais nutrientes, que podem ser macro ou micro). Podem ser encontrados no comércio no estado sólido ou líquido, que são dissolvidos ou diluídos em água, preparando-se a solução na concentração desejada.

A concentração dos macronutrientes (N + P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + K<sub>2</sub>O) varia entre 25 a 32% para os líquidos e 45 a 60% para os sólidos. Existe no mercado uma variedade muito grande de fórmulas NPK e de micronutrientes, separados em coquetéis. Como exemplo, em seguida uma mostra das disponibilidades (FERNANDES, 1987):

14 – 04 – 07 + 0,2% Mg

15 – 05 – 10

07 – 14 – 07

05 – 15 – 05

10 – 30 – 00

10 – 30 – 00

30 – 00 – 00 + Zn e B

Ca a 6%

Ca a 10% + 0,5% B

Zn a 7%

Zn a 7% + 0,5% B

Mg a 4% + 4% S

Ca a 1,5% + 3,0% Mo

Mo a 4%

Mo a 6%

Mn a 5%

Café (N-10%, Zn-4%, Mg-1,5%, B-0,5%, Fe-0,5%, S-2%)

Citrus (N-10%, Zn-3%, Mn-2%, B-0,4%, Fe-0,5%, Mg-1%)

As principais fontes de NPK utilizadas como matéria-prima para a produção de adubos foliares pelas indústrias são:

---

Uréia  
Amônia anidra ou hidróxido de amônio  
Nitrato de amônio  
Ácido fosfórico purificado (MAP)  
Fosfato monoamônio purificado (MAP)  
Hidróxido de potássio purificado  
Cloreto de potássio purificado  
Sulfato de potássio purificado

Para os macronutrientes secundários e micronutrientes as fontes utilizadas são cloretos, sulfatos e óxidos. Os cátions geralmente são quelatizados. Os agentes quelantes mais utilizados são o EDTA (ácido etileno diamino tetracético) ácido cítrico, ácido tartárico e ácido oxálico. Na produção de fórmulas NPK + micronutrientes, o coquetel de micros quelatizados é preparado separadamente e somente após são misturados.

De maneira geral, as concentrações de micronutrientes contidas nas formulações NPK são muito baixas e insuficientes para corrigir deficiências. Há produtos contendo maiores concentrações que deverão ser utilizados, como aqueles listados anteriormente.

As formulações de macronutrientes em geral são diluídas antes do uso para dar concentrações da ordem de 0,5 a 3% (peso/volume ou volume/volume) quando empregados a alto volume; a baixo volume as concentrações podem ser aumentadas sem risco de queima.

A Tabela 2.18. apresenta algumas recomendações para a correção de deficiências por via foliar, empregando-se produtos simples.

Como há uma tendência de se aplicar mais de um nutriente de uma só vez, bem como destes com defensivos, existe a necessidade de os adubos e os defensivos da mistura serem compatíveis uns com os outros, tanto do ponto de vista físico ou químico, quanto com respeito à nutrição das plantas. Não deve haver precipitação (insolubilização) ou perda por volatilização, como também a presença de um elemento na solução não deve impedir a absorção de outro a ponto de tornar ineficiente a aplicação. Tais questões devem estar presente na tecnologia de fabricação e na mente de quem vai usar o produto. Algumas citações são encontradas na literatura sobre este fato:

O sulfato de zinco não deve ser misturado com emulsão de óleos minerais. Neste caso, pode-se empregar o óxido de zinco que é compatível com as emulsões;

O sulfato de zinco, a calda sulfocálcica e outros compostos que têm reação alcalina não devem ser misturados com reguladores de crescimento;

O bórax e o sulfato de zinco são incompatíveis, devendo se utilizar o ácido bórico neste caso;

O ácido bórico é compatível com o óxido de zinco, uréia, DDT, paration e malation.

---

**TABELA 2.18** Recomendações para a correção de deficiências por via foliar

Deficiência de	Cultura	Formação de Aplicação	Concentração Kg/100 litros <sup>(1)</sup>
Nitrogênio	Abacaxi	Uréia	3-12
	Algodão		1,0-1,5
	Batatinha		2,0-2,5
	Cafeeiro		2,5
	Cana-de-açúcar		
	Banana, manga, chá		1,25-3,0
	Macieira, videira		0,50-0,75
	Tomateiro		2,0-2,5
Fósforo	Cafeeiro	Super simples	1
	Cana-de-açúcar	Fosfato de amônio ou De potássio	0,5-2,0
Potássio	Cafeeiro	Cloreto, sulfato, Nitrato	0,5
	Citrus	Sulfato	0,6-1,2
		Nitrato	0,3-1,2
Cálcio	Aipo	Cloreto	1,8-2,4
	Tomateiro (podridão estilar)		0,6-2,4
Magnésio	Aipo, citrus, macieira, Tomateiro, cafeeiro	Sulfato de Mg	1-2
Boro	Aipo, alfafa, beterraba, Crucíferas, frutíferas, cafeeiro	Borax ou outros	
		Boratos solúveis, Ácido bórico	0,1-0,3 0,3-0,5
Cobre	Hortaliças, frutíferas	Oxicloreto, e	
	Cafeeiro	Sulfato de cobre + cal	0,2-0,5
Ferro	Abacaxi, sorgo	Sulfato de Fe	0,6-2,0
Manganês	Aipo, citrus, feijões,		
	Soja, tomateiro	Sulfato de Mn	0,4-0,8
Molibdênio	Citrus ("Mancha amarela"),	Molibdato de sódio	
	Couve flor, repolho	Ou de amônio	0,05-0,10
Zinco	Plantas anuais	Sulfato de Zn	0,25-0,40
	Plantas perenes	Sulfato de Zn	0,60-1,00

(1) O primeiro número se refere a aplicações a alto volume.

Fonte: MALAVOLTA (1981).

Quanto à época de aplicação, como regra geral, a adubação foliar é feita nos períodos de maior exigência da cultura. Tal período ou períodos podem, às vezes, se traduzir pelas épocas em que começam a aparecer os sintomas de deficiência. Mas, nem

sempre a regra é obedecida, citando-se como exemplos a adubação foliar nitrogenada em mudas de cafeeiro em viveiro; B e Mo em mudas nas sementeiras de hortaliças e o aproveitamento de operações, juntando-se defensivos com adubos foliares com o objetivo de controlar enfermidades ou pragas e alimentar a planta em uma única operação.

Alguns fatores discutidos em Fatores Externos, que afetam a absorção foliar devem ser aqui lembrados. A aplicação da solução deve ser feita nas horas menos quentes do dia, pela manhã ou a tarde. Porém, se a umidade do ar e do solo forem altas, a adubação foliar pode ser feita a qualquer hora do dia.

Para que a solução aplicada molhe adequadamente as folhas, proporcionando um bom contato com a superfície foliar, é necessário em muitos casos a adição de surfactantes (agentes molhantes ou adesivos) à solução. Folhas de cafeeiro e de plantas com cutícula apresentando altos teores de cera, como repolho, couve, alho, ervilha, etc., por exemplo, são particularmente difíceis de molhar. Convém ressaltar também, a importância da solução atingir a parte abaxial das folhas.

A reação (pH) da solução para aplicação foliar deve ser levemente ácida, com pH entre 5 a 6. Como visto, a presença da uréia e de KCl na solução aumentam a absorção foliar de nutrientes, o que justifica a inclusão nas formulações.

### **Vantagens e Desvantagens da Adubação Foliar**

Uma das vantagens mais enfatizadas da adubação foliar é o alto índice de utilização, pelas plantas, dos nutrientes aplicados nas folhas em relação à aplicação no solo. No solo, os nutrientes estão sujeitos a reações de insolubilização ou de perdas por lixiviação, ao passo que quando aplicados nas folhas são em grande parte absorvidos. Assim, as doses necessárias na adubação foliar são menores do que na adubação no solo. Contudo, os efeitos residuais da adubação foliar são muito pequenos ou nulos, o que exige grande frequência de aplicações. No caso do ferro, a adubação no solo é ineficiente, a menos que sejam usados quelatos, os quais são caros. Assim, a adubação foliar é a melhor alternativa.

Na adubação foliar, diferentemente da aplicação no solo, uma distribuição uniforme é facilmente obtida. As respostas das plantas à adubação foliar são rápidas, sendo possível corrigir deficiências após o seu aparecimento, durante a fase de crescimento das plantas (adubação de salvação). Contudo, neste caso, os rendimentos das culturas podem já ter sido irremediavelmente comprometidos.

Os custos extras das múltiplas aplicações, que muitas vezes são necessárias devido à menor mobilidade dos micronutrientes (e imobilidade do Ca e do B), são uma séria desvantagem da adubação foliar, a menos que possa ser combinada com tratamentos fitossanitários.

Soluções com concentrações maiores do que 3% podem causar queima nas folhas. A quantidade de solução utilizada varia de 400 a 800 l/ha nas aplicações a alto volume,

para as quais são empregadas menores concentrações dos nutrientes em relação à aplicação a baixo volume (Tabela 2.17.).

## 2.3 TRANSPORTE E REDISTRIBUIÇÃO

### Transporte

Como já definido no item 2.1.1., o transporte ou translocação é o movimento ou transferência do íon do local de absorção para outro qualquer, dentro ou fora da raiz. Portanto, para que o íon absorvido pela raiz possa atingir a parte aérea, o mesmo deve sofrer o transporte radial e o transporte a longa distância.

No transporte radial, o íon  $M$  percorre o caminho desde as células da epiderme da raiz até os vasos no cilindro central; e o faz por duas vias: apoplasto e simplasto (Figura 2.27).

Da epiderme até a camada única das células da endoderme,  $M$  anda pelas paredes celulares e espaços intercelulares (= apoplasto); pode também passar de uma célula para outra caminhando pelo citoplasma e seus prolongamentos entre duas células (plasmodesmos), ou seja, pelo continuum citoplasmático, que é o simplasto.

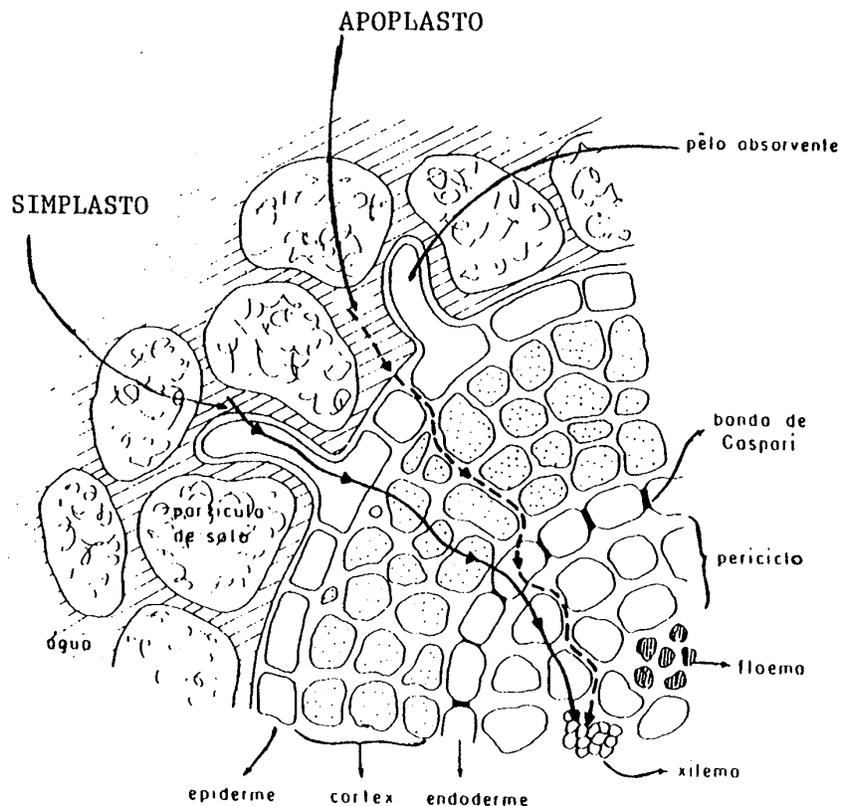


FIGURA 2.27 Corte transversal de raiz primária

A travessia apoplástica da endoderme é impedida pelas estrias de Caspari, constituídas de suberina, as quais cimentam radialmente uma célula à outra: é necessário recorrer então à via simplástica.

Da endoderme, às vezes, o elemento tem as duas alternativas para percorrer: apoplasto e simplasto.

O transporte a longa distância significa o caminhar do M da raiz para a parte aérea; predominantemente no xilema, embora alguns elementos, como o potássio, também o faça pelo floema.

A Figura 2.28, tirada de MALAVOLTA et al. (1989), ilustra o transporte de M:

Os íons entram no espaço livre aparente por processos passivos, conforme já foi visto;

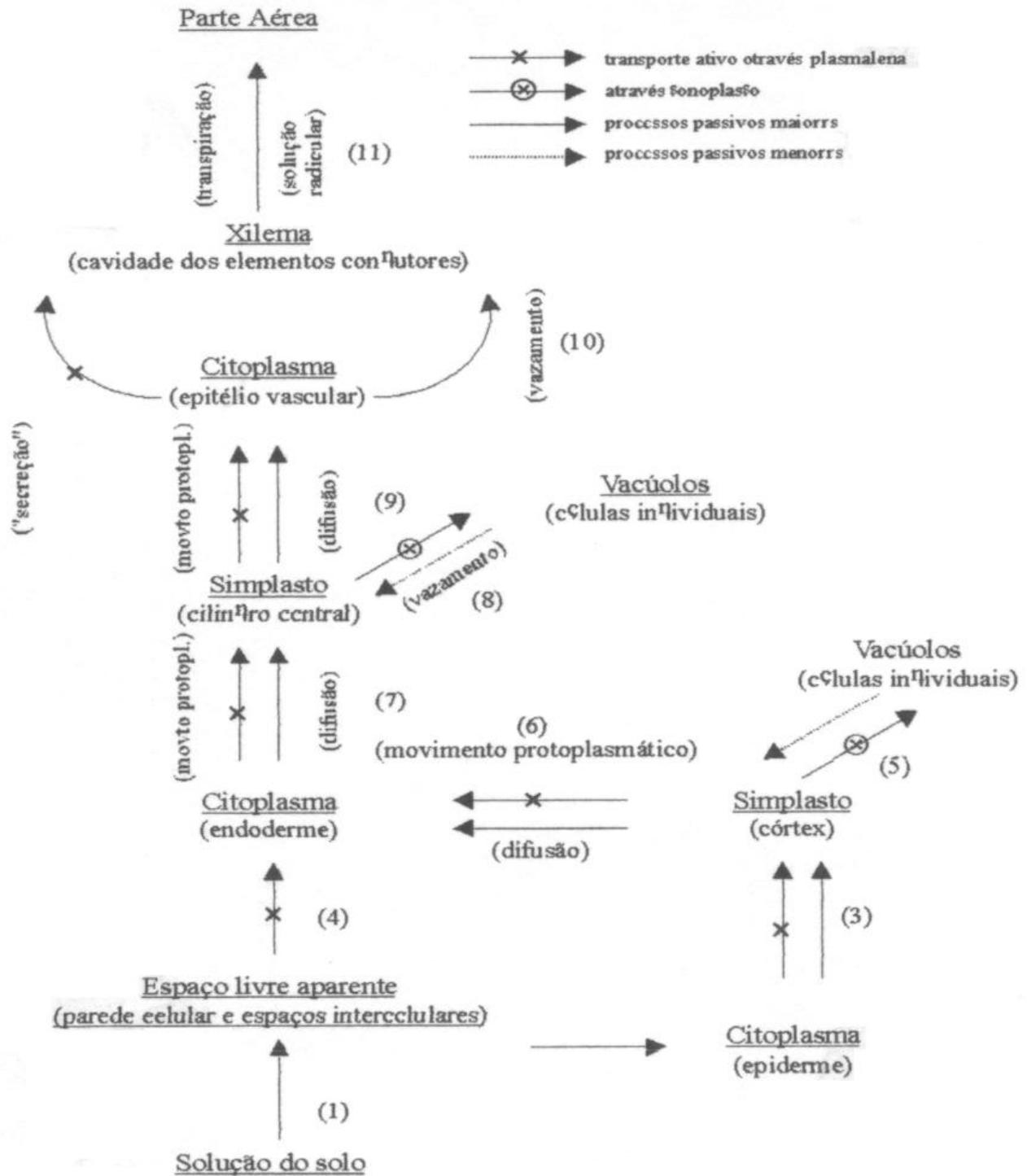
(2,3) Vencida a barreira do plasmalema, e com a ajuda do carregador, entram no simplasto;

(4,9) Os íons são depois levados aos vácuos e em parte migram via simplasto até atingir os vasos;

(10) Ao chegar no epitélio vascular, penetram a superfície citoplasmática adjacente aos vasos, sendo finalmente depositados nas cavidades do xilema;

(11) O movimento da seiva do xilema até a parte aérea é considerado inteiramente passivo, ocorrendo por fluxo de massa sob a influência da transpiração ou de pressão osmótica gerada nas raízes.

---



**FIGURA 2.28** Representação geral dos processos de transporte (Oberlander, 1966, em MALAVOLTA et al., 1989).

## Redistribuição

Também como já foi definido no item 2.1.1., a redistribuição trata-se da transferência do elemento de um órgão ou região de acúmulo para outro qualquer. Os íons armazenados nas folhas durante os estádios de crescimento podem delas sair antes da senescência e da abscisão, sendo então redistribuídos para outros órgãos – folhas mais novas, órgãos de reserva, frutos, regiões de crescimento. Esta redistribuição (remobilização) dos elementos difere entre os nutrientes e reflete na localização dos sintomas visuais de deficiência nutricional nas plantas. Sintomas de deficiência nas folhas mais velhas correspondem a uma alta taxa de remobilização do nutriente, enquanto que nas folhas mais novas e meristemas apicais refletem uma insuficiente redistribuição. A redistribuição dá-se predominantemente pelo floema. A Tabela 2.18. sumariza estas características.

**TABELA 2.19 Redistribuição dos nutrientes e os órgãos onde os sintomas de deficiência ocorrem primeiro**

Nutrientes	Redistribuição	Sintomas visuais de deficiência ocorre:
N, P, K e Mg	Móveis	Folhas velhas
S, Cu, Fe, Mn, Zn e Mo	Pouco móveis	Folhas novas
B e Ca	Imóveis	Folhas novas e meristemas

Fonte: MARSCHNER (1986).

Esta maior ou menor mobilidade no floema tem relevância prática:

ocorrendo diminuição no suprimento de nutrientes do solo para a planta, os sintomas aparecem (Tabela 2.18.):

- elementos móveis – folhas velhas
- elementos pouco móveis – folhas novas
- elementos imóveis – folhas novas e meristemas apicais
- a cultura exige um suprimento contínuo dos nutrientes pouco móveis e imóveis. Com a diminuição, não haverá mobilização suficiente do elemento dos órgãos mais velhos para atender às exigências dos mais novos.

Aplicação do adubo – para os pouco móveis e imóveis, o suprimento contínuo é feito mais eficientemente pelo solo. Via foliar, como visto, devido à necessidade de um grande número de aplicações, torna a prática antieconômica.

## EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS E FUNÇÕES DOS NUTRIENTES

---

---

### 3.1 EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS

A expressão “exigências nutricionais”, refere-se às quantidades de macro e micronutrientes que uma cultura retira do solo, do adubo e do ar (caso do N fixado, por ex.), para atender às suas necessidades, crescer e produzir adequadamente.

Não é comum a colheita da planta inteira (raízes, caule + ramos, folhas e frutos): quantidades substanciais de nutrientes são deixados, freqüentemente, no solo pelos restos culturais. Nas culturas perenes a proporção de elementos imobilizada é muito maior que aquela exportada pelo produto colhido. Mas, para que a produção máxima econômica seja obtida, as exigências da planta toda – não só do produto colhido – deve ser atendida e fornecida pelo meio – solo, adubo etc.

A quantidade de nutrientes exigida é função dos seus teores no material vegetal e do total de matéria seca produzida. Como a concentração e a produção variam muito, as exigências minerais de diferentes espécies também o fazem. É o que mostram as Tabelas 3.1. – macronutrientes e 3.2. – micronutrientes, para algumas das principais culturas brasileiras. Observa-se também, de modo geral, que as exigências totais obedecem à seguinte ordem decrescente:

---

**TABELA 3.1 Exigências em macronutrientes (Kg/ha) de algumas culturas brasileiras**

Cultura	Colheita t/ha	N	P	K	Ca	Mg	S
- Cereais -							
Arroz							
Grãos	3,2	45	8,1	12	2	3	5,1
Casca	1,1	8	1,5	6	2	1	1,2
Colmo + folhas	4,1	28	4,2	74	16	3	4,4
Total	8,4	81	13,8	92	20	7	10,7
Milho							
Grãos	6,4	122	24	30	0,4	10,0	9
Palha + Sabugo	-	7	2	12	0,7	0,9	1
Colmo + folhas	-	176	30	215	34,9	37,1	34
Total	-	305	56	257	36,0	48,0	44
Trigo							
Grãos	3	75	15	12	3	9	5
Palha	9	50	7	80	13	5	9
Total	8	125	22	92	16	14	14
- Leguminosas de grãos -							
Soja							
Vagens	3	200	26	57	10	10	6
Ramos	6	100	14	58	60	25	17
Total	9	300	40	115	70	35	23
Feijoeiro							
Vagens	1	37	4	22	4	4	10
Ramos	2	65	5	71	50	14	15
Total	3	102	9	93	54	18	25
Algodoeiro							
Raízes	-	6	0,2	3	1	0,7	0,8
Caules+ramos							
+ folhas	-	49	3,9	39	49	7,2	22,0
Sementes	1,3	29	4,0	24	11	4,9	10,0
Total		84	81	66	61	12,8	32,8
Sisal							
Planta	-	118	19	140	290	40	-
- Sacarinas e de amido -							
Cana de açúcar							
Colmos	100	76	15	110	30	26	25

Continua.....

Continuação - TABELA 3.1.

Cultura	Colheita t/ha	N	P	K	Ca	Mg	S
Batatinha							
Tubérculos	40	80	5	100	3	3	3
Ramos	-	120	3	120	49	14	8
Total	-	200	8	220	52	17	11
- Estimulantes -							
Cafeeiro							
Tronco+ramos							
+ folhas	-	220	16	180	136	30	24
Frutos (côco)	2	33	3	52	7	3	3
Total	-	253	19	232	142	33	27
Fumo							
Folhas	15	75	8	70	30	10	-
- Frutíferas -							
Laranjeira							
Frutos	6 cx/pé	91	9	72	25	6	7,2
Videira							
Frutos	30	66	18	60	3	3	6
Macieira							
Frutos	15	10	1,5	16	1	0,6	1,0
Abacateiro							
Frutos	10	22	3	37	1,3	1,5	2
Pessegueiro							
Frutos	20	70	6	40	1,2	2,4	
- Florestais -							
Eucalipto							
Madeira	-	60	6	50	80	20	-
- Forrageiras -							
Gramíneas							
Parte aérea	13-25	200-300	30-70	200-500	50-150	20-75	20-75
Leguminosas							
Parte aérea	-	100-200	10-20	80-110	80-130	15-20	10-20
- Hortaliças							
Repolho							
Caule+folhas	-	140	14	121	-	27	-
Cabeça	84	140	17	128	-	9	64
Total	-	280	31	249	-	36	-
Continua....							

Continuação - TABELA 3.1.

Cultura	Colheita t/ha	N	P	K	Ca	Mg	S
Caule+folhas	-	140	14	121	-	27	-
Cabeça	84	140	17	128	-	9	64
Total	-	280	31	249	-	36	-
Beringela							
Frutos	20	44	6	95	8	6	3
Parte aérea	-	45	4	47	35	8	3
Total	-	89	10	142	43	14	6
Tomateiro							
Frutos	41	72	18	130	7	7	9
Raízes+parte							
Aérea	-	12	3	55	24	1	19
Total	-	84	21	185	31	8	28
Pimentão							
Frutos	16	34	6	49	5	3	4
Parte aérea	-	31	6	42	2	3	4
Total	-	65	12	91	7	6	8
Cenoura							
Raízes	-	90	12	70	16	7	6
Parte aérea	-	100	4	170	150	6	27
Total	-	190	16	240	166	13	33

Fonte: Malavolta (1976) e Malavolta (1980).

**TABELA 3.2 Exigências em micronutrientes (g/ha) de algumas culturas brasileiras**

Cultura	Colheita t/ha	B	C1	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
- Cereais -								
Arroz								
Grãos	3,2	13	0,5	17	123	57	0,4	146
Casca	1,1	6	0,4	9	141	51	0,3	30
Colmo+folhas	4,1	58	10,0	10	868	321	0,4	139
Total	8,4	77	10,9	36	1.132	429	1,1	315

Continua.....

Continuação - TABELA 3.2.

Cultura	Colheita t/ha	B	C1	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Milho								
Grãos	6,4	20	2.000	25	160	53	2,5	178
Palha+sabugo	-	-	-	9	50	28	-	178
Colmo+folhas	-	60	34.000	147	1.664	686	1,5	339
Total	-	80	36.000	181	1.874	767	4,0	544
Trigo								
Grãos	3	100	-	-	190	140	-	120
Palha	5	200	-	-	500	320	-	80
Total	8	300	-	-	690	460	-	200
- Leguminosas de grãos -								
Soja								
Total	9	100	1.000	100	1.700	600	10	200
- Fibrosas -								
Algodoeiro								
Raízes	-	5	-	2	262	5	0,2	2
Parte aérea	-	117	-	44	1.163	106	1,0	42
Sementes	1,3	43	-	13	316	19	0,2	16
Total	-	165	-	59	1.691	130	1,4	60
- Sacarinos e de amido -								
Cana de açúcar								
Colmos	100	4	-	5	3.132	1.566	2	486
Batatinha								
Tubérculos	40	150	-	120	-	270	-	150
Cafeeiro								
Frutos (côco)	2	50	-	30	160	40	0,5	80
- Frutíferas -								
Laranjeira								
Frutos	6cxs/pé	105	1.200	58	317	134	0,4	43
Videira								
Frutos	30	120	420	120	90	60	0,2	18
Macieira								
Frutos	15	15	75	15	120	12	0,015	3
Abacateiro								
Frutos	10	60	-	33	85	16	1,7	51
Pessegueiro								
Frutos	20	30	600	20	100	30	0,08	20

Continua....

Continuação - TABELA 3.2.

Cultura	Colheita t/há	B	C1	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
- Forrageiras -								
Gramíneas								
Parte aérea	10-25	250-700	-	300-600	5.000-10.000	1.000-3.000	-	900-1.500
Leguminosas	-	200-600	-	60-100	900-1.000	500-600	-	250-300
- Hortaliças -								
Berinjela								
Total	20(frutos)	132	-	11	177	80	-	93
Tomateiro								
Total	41(frutos)	90	-	120	700	980	-	-
Pimentão								
Total	16 (frutos)	11	-	8	44	27	-	12
Cenoura								
Raízes	-	200	-	30	240	-	-	-
Parte aérea	-	75	-	15	1.550	-	-	-
Total	-	275	-	45	1.790	400	-	200

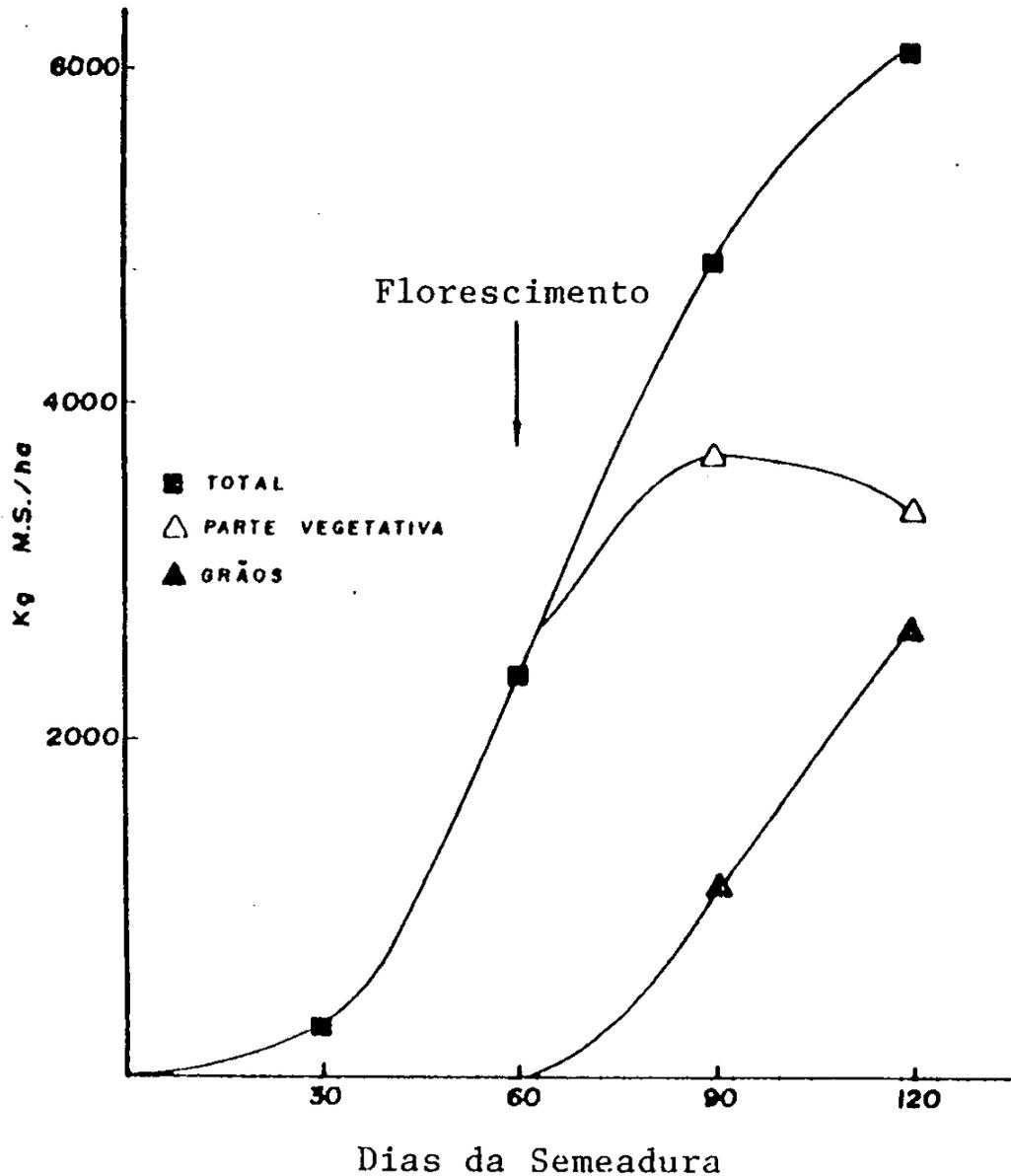
FONTE: Malavolta (1976) e Malavolta (1980).

- Macronutrientes: N > K > Ca > Mg > P = S
- Micronutrientes: Fe > Mn > Zn > B > Cu > Mo

Com relação à exportação dos nutrientes pelo produto, esta seqüência nem sempre é obedecida, principalmente nas espécies produtoras de grãos e frutos, onde o P, de maneira geral, é o terceiro nutriente mais exportado, após o N e o K. A exportação de Ca torna-se importante quando o produto colhido é a parte aérea ou parte dela como, por exemplo, as forrageiras, cana-de-açúcar, eucalipto. Quanto maior a exportação dos elementos pelo produto, mais rápido é o empobrecimento do solo, o que requer a adequada reposição dos mesmos por práticas, tais como a da calagem e da adubação.

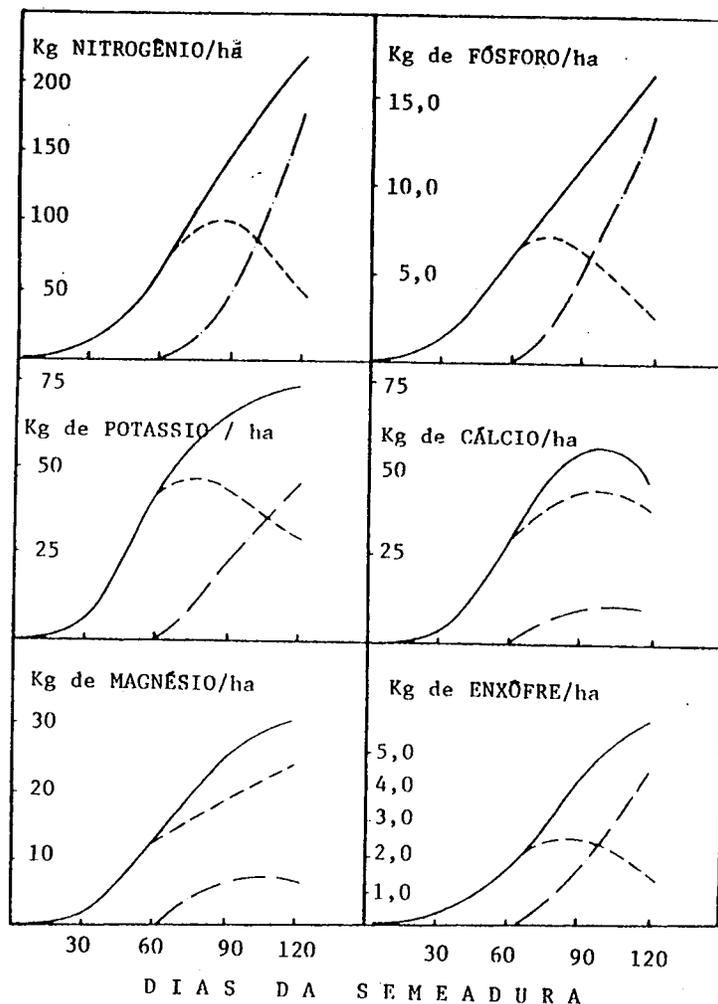
A extração pelas plantas dos nutrientes do solo, não se faz nas mesmas quantidades durante seus vários estádios de crescimento. Tanto para as culturas anuais quanto para as perenes nos seus estádios produtivos, a curva que descreve a extração dos nutrientes em função do tempo é, em geral, uma sigmóide, tal como ocorre com a produção de matéria seca, como mostram as Figuras 3.1. e 3.2. Quando a planta é nova a absorção dos nutrientes do solo é muito pequena; segue-se um período de acumulação logarítmica, ou seja, uma grande produção de matéria seca e, portanto, na absorção dos nutrientes; num período final, em que a planta entra no período de maturação, há uma

fase de estabilização, onde a absorção é muito pequena ou mesmo nula. Nota-se uma perfeita sobreposição das curvas que representam a produção de matéria seca (Figura 3.1) com aquelas da acumulação de macronutrientes (Figura 3.2) pela soja. Estas informações têm um aspecto prático muito importante, relacionado às adubações de cobertura, principalmente do N e do K, que deverão ser realizadas nos períodos iniciais de grande absorção.



**FIGURA 3.1** Acumulação de matéria seca pela soja cv. Santa Rosa, em função da idade da planta

(BATAGLIA & MASCARENHAS, 1977).



**FIGURA 3.2** Acumulação de macronutrientes pela soja ( - total; - folhas + ramos + vagens; -.- grãos).  
(BATAGLIA & MASCARENHAS, 1977).

### 3.2 FUNÇÕES DOS NUTRIENTES

Como visto no Capítulo 1, para que um elemento químico seja considerado essencial, o mesmo deve atender aos critérios direto e/ou indireto de essencialidade. Assim, os nutrientes exercem funções específicas na vida da planta, embora em algumas delas possa haver, dependendo do elemento, um certo grau de substituição.

Podem-se classificar, portanto, as funções exercidas pelos nutrientes em três grandes grupos:

Estrutural – o elemento faz parte da molécula de um ou mais compostos orgânicos da planta, citando como exemplos:

N – componente de aminoácidos, proteínas etc;

Ca – pectato de cálcio da lamela média da parede celular;

Mg – componente da molécula de clorofila.

Constituinte de enzimas – trata-se de um caso particular do primeiro; refere-se geralmente a metais ou elementos de transição (Mo), que fazem parte do grupo prostético de enzimas e que são essenciais à atividade das mesmas; citando-se o Fe, Cu, Mn, Mo, Zn e Ni.

Ativador enzimático – sem fazer parte do grupo prostético, o elemento dissociável da fração protéica da enzima, é necessário à atividade da mesma.

O boro, é um caso especial que não se enquadra nesses grupos, pois suas funções ainda não foram demonstradas de maneira inequívoca; não atende ao critério direto da essencialidade, mas satisfaz o critério indireto.

Para o melhor entendimento das funções exercidas pelos elementos nos grupos (b) e (c), torna-se importante recordar do que se trata o termo geral “cofator”.

“Cofatores” são componentes adicionais que um grande número de proteínas enzimáticas exigem para exercer suas atividades catalíticas. Os cofatores podem ser divididos em: grupos prostéticos, coenzimas e ativadores metálicos.

Um “grupo prostético” é usualmente considerado como um cofator firmemente ligado à proteína enzimática. Assim, por exemplo, o grupo heme (porfirina de ferro) forma o grupo prostético de numerosas enzimas (catalase), peroxidase, citocromos, citocromo oxidase).

Uma “coenzima” é uma molécula orgânica pequena, termoestável, que facilmente, dissocia-se da proteína enzimática, separando-se da enzima. Assim, o  $\text{NAD}^+$  e o  $\text{NADP}^+$  são exemplos de coenzimas.

Os “ativadores metálicos” são cátions metálicos mono ou divalentes como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , indispensáveis para a atividade de um grande número de enzimas. Estes íons podem estar frouxa ou firmemente ligados a uma proteína enzimática, presumivelmente por quelação com grupos fenólicos, amídicos ou carboxílicos. Como exemplo temos o  $\text{Mg}^{2+}$  para as fosfatases, quinases, o  $\text{Mn}^{2+}$  para quinase, peptidases etc.

## Funções dos Macronutrientes

### NITROGÊNIO

#### • Aspectos Gerais

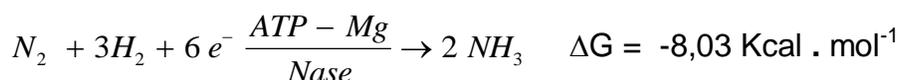
De maneira geral, o N é o nutriente mineral mais exigido pelas plantas (Tabela 3.1.). A atmosfera, que possui aproximadamente 79 % de N na forma de  $\text{N}_2$ , principalmente, é a fonte natural do elemento para a biosfera. Mas, o  $\text{N}_2$  é uma fonte natural gasosa e não diretamente aproveitado pelas plantas. Para tal, há necessidade de uma transformação prévia para formas combinadas,  $\text{N-NH}_4^+$  (amônio) e  $\text{N-NO}_3^-$  (nitrato). Os principais processos responsáveis pela fixação do  $\text{N}_2$  atmosférico para formas combinadas são a fixação biológica, fixação industrial e fixação atmosférica.

---

A fixação industrial trata-se da produção dos adubos nitrogenados industrialmente, a partir da quebra da molécula do nitrogênio ( $N_2$ ) e produção da amônia ( $NH_3$ ), produto-chave para a obtenção dos adubos nitrogenados.

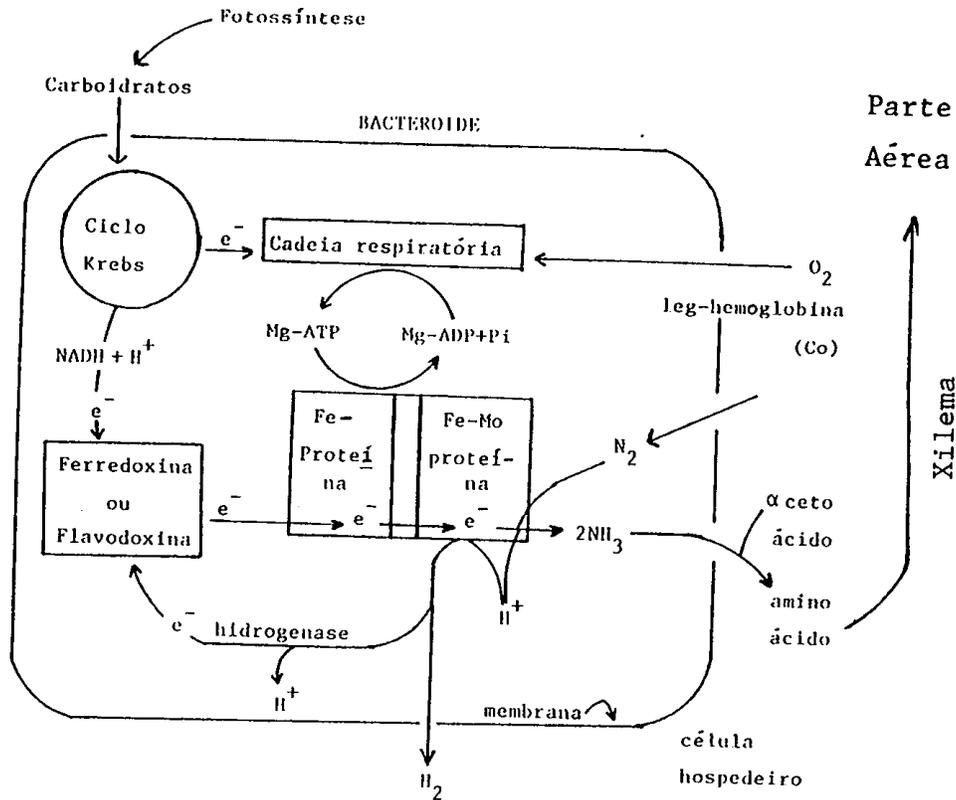
A Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) consiste na conversão do  $N_2$  atmosférico, para formas combinadas pela ação de microorganismos, e é o principal processo de adição do  $N_2$  ao solo. Atualmente são conhecidos vários microorganismos e sistemas capazes de fixar N do ar, cujos detalhes podem ser encontrados no Módulo 4 deste curso (SIQUEIRA, 1993). Aqui, apenas será dada ênfase à participação de outros nutrientes no processo, dos quais depende para a eficiente fixação.

A FBN em todos os sistemas conhecidos é um processo mediado por um complexo enzimático denominado Nitrogenase (Nase) e com a participação direta de diversos nutrientes minerais como o Fe, Mo, Mg, Co e P (ATP). A reação geral pode assim ser descrita:



O sistema fixador de nitrogênio de maior interesse agrícola é o sistema simbiótico constituído pela associação radicular entre bactérias do gênero *Bradyrhizobium* e plantas da família das leguminosas, que desenvolvem nódulos radiculares característicos. Diversos fatores do solo (pH, N-combinado, P, Mo, Co, Ca, Mg, etc) e da planta e bactéria (compatibilidade) afetam a eficiência de fixação.

A Figura 3.3. esquematiza as principais reações da FBN. A ligação tripla existente entre os átomos de dinitrogênio (N=N) é rompida e três átomos de H são ligados a cada N, formando-se 2  $NH_3$  (amônia). Os H ( $e^- + H^+$ ) e a energia necessários para o processo, são obtidos pela oxidação de carboidratos fornecidos pela fotossíntese do hospedeiro, produzindo-se o redutor biológico fornecedor de H ( $NADH + H^+$ ) e a energia metabólica na forma de ATP.



**FIGURA 3.3** Reações metabólicas da FBN nos bacteróides  
(MENGEL & KIRKBY, 1987).

A Nase, já referida, complexo enzimático responsável pela fixação do  $N_2$  é composta de duas Fe – S – proteínas, denominadas de Fe – proteína – com 4 átomos de Fe e 4 átomos de S, e Fe – Mo – proteína – com 24-36 átomos de Fe e 2 átomos de Mo.

Devido ao caráter anaeróbico da FBN – sensibilidade ao  $O_2$  das duas proteínas da Nase; auto-oxidação da ferredoxina e flavodoxina que atuam como transportadores de elétrons – os nódulos ativos apresentam uma coloração avermelhada típica, que é devida à leghemoglobina, que tem a função de transportar o  $O_2$  para o metabolismo oxidativo de que se origina o ATP. Neste caso, o cobalto (Co) torna-se essencial ao processo – e conseqüentemente às leguminosas que dependem da FBN – pois sabe-se que o Co faz parte da estrutura das vitaminas  $B_{12}$  e que estas são necessárias para a síntese da leghemoglobina.

Quando as condições de fixação não são ótimas, há a produção de  $H_2$  ( $2 e^- + 2 H^+$ ) reduzindo assim a eficiência da fixação do  $N_2$ . Entretanto, alguns fixadores mais eficientes são capazes de quebrar o  $H_2$  ( $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ ) pela atividade de enzima hidrogenase e reciclar os elétrons para a Nase que serão usados na redução do  $N_2$ .

A amônia ( $NH_3$ ) produzida no processo é transferida para fora do bacteróide e no hospedeiro é incorporada a alfa-ceto-ácidos formando compostos como a glutamina,

uréicos e asparagina que serão transportados via xilema para a parte aérea da planta, onde entrarão no metabolismo normal do nitrogênio.

### • Nitrogênio na planta

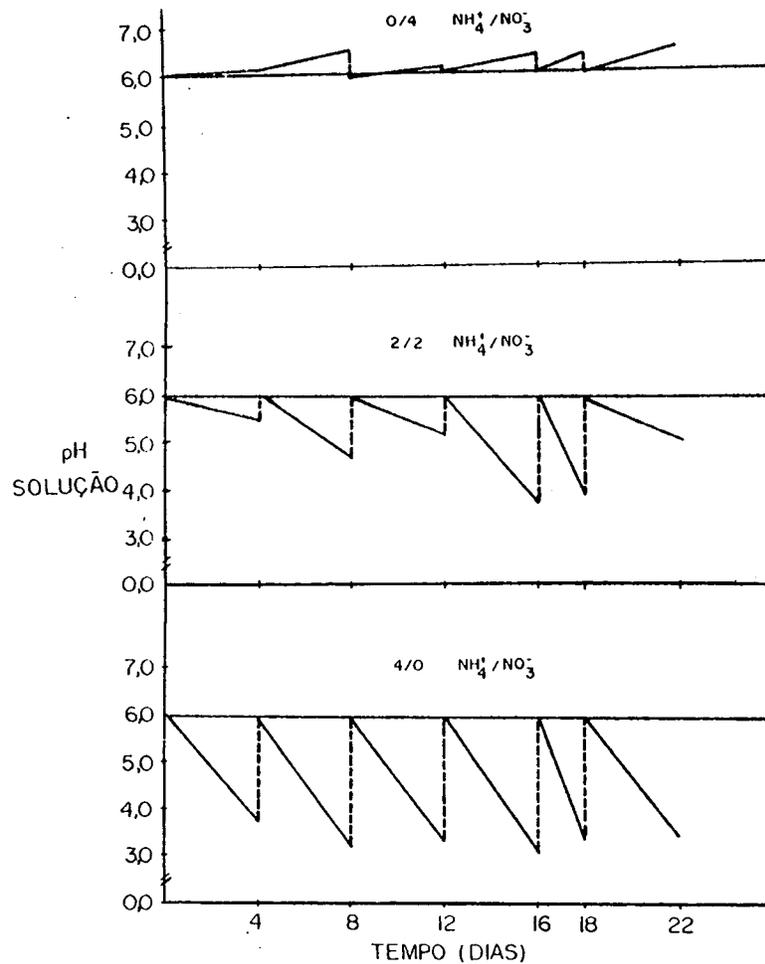
Os tecidos vegetais apresentam, de maneira geral, teores de N que variam de 2 a 5% da matéria seca: com poucas exceções às culturas é também o mineral mais exigido pelas plantas (Tabela 3.1.).

Absorção, transporte e redistribuição – esses termos já foram definidos no Capítulo 2 deste volume, Com relação ao N, as plantas são capazes de absorvê-lo do meio em diferentes formas:  $N_2$  – caso das leguminosas pela FBN; uréia e na forma mineral como  $NH_4^+$  e  $NO_3^-$ , sendo esta última predominante em condições naturais, devido ao processo de nitrificação. Ambas as formas minerais são rapidamente absorvidas pelas raízes das plantas (ver Capítulo 2) e a maior absorção de uma forma em relação a outra é acompanhada por variações no pH do meio, como mostra a Figura 3.4. Para a manutenção da neutralidade elétrica interna no citoplasma, com a absorção do  $NH_4$  há a extrusão de um próton ( $H^+$ ) para o meio; da mesma maneira para o  $NO_3^-$  com o  $OH^-$  ou  $HCO_3^-$ ; o que promove o abaixamento ou elevação do pH do meio, respectivamente. Além do processo de nitrificação, este é um fator adicional de acidificação do solo quando se aduba plantas com fertilizantes amoniacais.

O pH do meio afeta a absorção do N da seguinte maneira: o pH ácido inibe a absorção do  $NH_4^+$  e favorece a do  $NO_3^-$  em pH neutro/alcalino o contrário é observado. Possivelmente, devido a efeitos competitivos do  $H^+$  e  $OH^-$  no processo de absorção do  $NH_4^+$  e do  $NO_3^-$ , respectivamente.

O N absorvido pelas raízes é transportado para a parte aérea da planta através dos vasos do xilema, via corrente transpiratória. A forma pela qual o N é transportado, depende da forma em que foi absorvido, assimilado (incorporado a compostos orgânicos) nos tecidos das raízes e transportado como aminoácidos. O N- $NO_3^-$  pode ser transportado como tal para a parte aérea, mas isto depende do potencial de redução do nitrato das raízes ( ver a frente). Portanto, N- $NO_3^-$  e aminoácidos são as principais formas de transporte de N no xilema de plantas superiores. Nas plantas fixadoras de  $N_2$ , como já referido, o transporte do N fixado é feito em compostos como a glutamina, uréidos e asparagina.

O N é facilmente redistribuído nas plantas via floema, na forma de aminoácidos. Quando o suprimento de N pelo meio é insuficiente, o N das folhas velhas é mobilizado para os órgãos e folhas mais novas. Conseqüentemente, plantas deficientes em N mostram os sintomas primeiramente nas folhas velhas. A proteólise das proteínas nesta condições e a redistribuição dos aminoácidos, resultam no colapso dos cloroplastos e assim ocorre um decréscimo no conteúdo de clorofila. Por esta razão, o amarelecimento das folhas velhas é o primeiro sintoma de uma inadequada nutrição da planta em nitrogênio.



**FIGURA 3.4** Variação de pH na solução nutritiva durante o cultivo de feijão em diferentes proporções de amônio; nitrato. A linha tracejada representa a correção do pH para o valor original (+ou- 6,0)

(GUAZZELI, 1988).

Funções do *nitrogênio* – Cerca de 90% do N da planta encontra-se em forma orgânica e é assim que desempenha as suas funções, como componente estrutural de macromoléculas e constituinte de enzimas. Os “aminoácidos livres” dão origem: a outros aminoácidos e às proteínas e, por conseqüência, às coenzimas; são precursores de hormônios vegetais – triptofano do AIA e metionina do etilemo; núcleos porfirínicos – clorofila e citocromos; reserva de N nas sementes – asparagina, arginina; às “bases nitrogenadas” (púricas e pirimídicas), aos nucleosídeos; nucleosídeos e por polimerização destes ácidos nucléicos – DNA e RNA; ATP; coenzimas como o NAD (dinucleotídeo de nicotinamida e adenina) e o NADP (dinucleotídeo de nicotinamida adenina e fosfato).

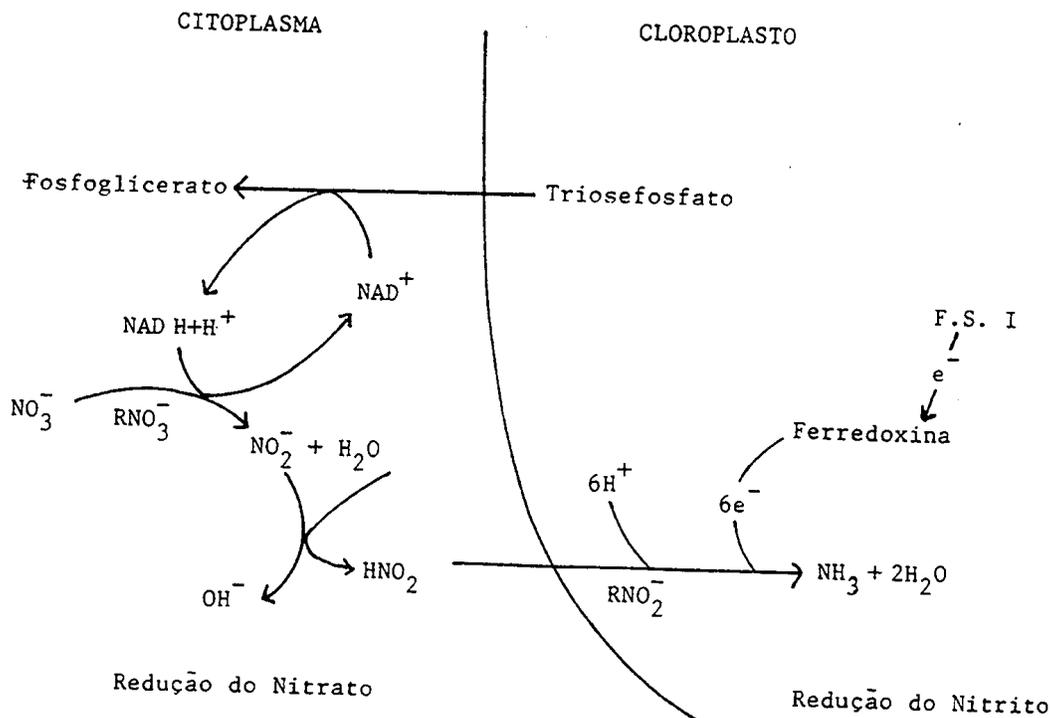
Nos compostos orgânicos o N aparece na forma reduzida (-3), o que corresponde ao  $\text{NH}_3$ . Como é absorvido predominantemente como N-  $\text{NO}_3$  (+ 5), oxidado, quer dizer que

houve uma redução antes da assimilação (incorporação a compostos orgânicos).



Trata-se da chamada redução assimilatória do nitrato.

A redução do nitrato ocorre basicamente em dois estágios: no primeiro há redução do  $\text{NO}_3^-$  para  $\text{NO}_2^-$  (nitrito) e no segundo há redução do  $\text{NO}_2^-$  para  $\text{NH}_3$ . Geralmente é aceito o esquema da Figura 3.5 para ilustrar a redução do nitrato nos tecidos das plantas. Duas enzimas são envolvidas no processo, a redutase do nitrato ( $\text{RNO}_3^-$ ) e redutase do nitrito ( $\text{RNO}_2^-$ ). A  $\text{RNO}_3^-$  catalisa a primeira reação ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ ), a qual ocorre nos cloroplastos e é catalisada pela  $\text{RNO}_2^-$ . Ambas enzimas funcionam em séries e a despeito da separação espacial não ocorre acúmulos apreciáveis de  $\text{NO}_2^-$ , possivelmente devido a  $\text{RNO}_2^-$  estar presente em níveis bem superiores aos de  $\text{RNO}_3^-$ .



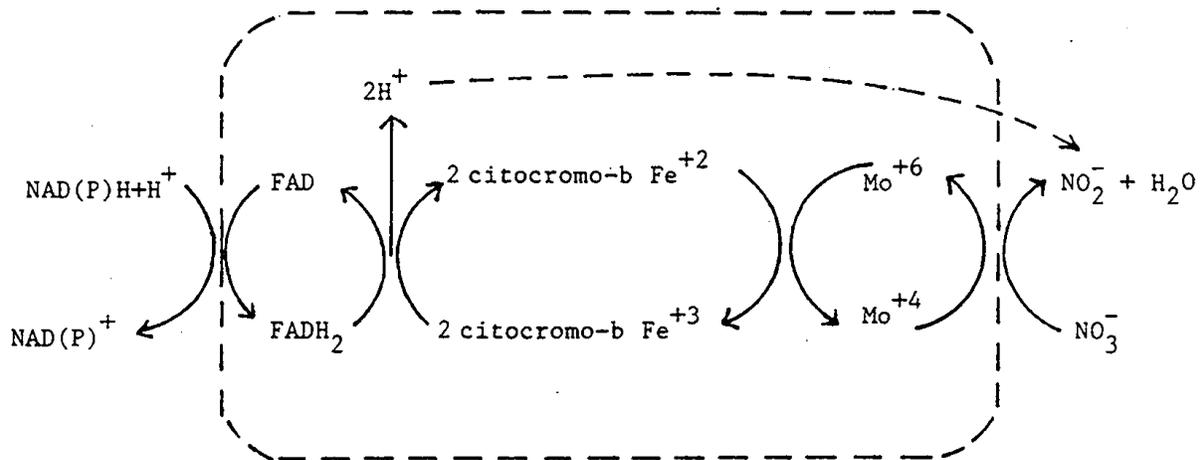
**FIGURA 3.5** Esquema da redução do nitrato e do nitrito

(MENGEL & KIRKIBY, 1987).

A  $\text{RNO}_3^-$  apresenta as seguintes características: é uma flavoproteína (FAD = dinucleotídeo de flavina e adenina); contém Fe e Mo; é uma enzima adaptativa e a atividade é induzida pelo  $\text{NO}_3^-$  e Mo. A enzima apresenta três grupos prostéticos, FAD, citocromo e Mo, os quais funcionam em série como mostra a Figura 3.6. A enzima localiza-se no citoplasma e requer o NADH ou NADPH como doador de elétrons. Admite-

se, como mostra a Figura 3.6., que os elétrons são transferidos diretamente do Mo para o  $\text{NO}_3^-$ . Baixos níveis de  $\text{RNO}_3^-$  nas plantas são observados sob condições de baixas concentrações de  $\text{RO}_3^-$  e deficiência de Mo. A Tabela 3.3 mostra que em plantas deficientes em Mo, a atividade da  $\text{RNO}_3^-$  é baixa e que a incubação de segmentos de folhas da planta em solução com Mo, aumenta marcadamente a atividade em curto espaço de tempo. Destes resultados dois aspectos podem ser destacados: o primeiro é que a diferença da atividade da  $\text{RNO}_3^-$  em plantas deficientes e não em Mo pode ser utilizada para avaliação do estado nutricional da planta nos micronutrientes; o segundo é que em plantas deficientes em Mo há acúmulo de  $\text{NO}_3^-$ . O acúmulo de nitrato em plantas alimentícias (hortaliças) e forrageiras é indesejável, pois quando ingerido o nitrato pode ser reduzido a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), entrar na corrente sangüínea e causar a metahemoglobinemia (forma estável da hemoglobina que perde sua função carregadora de  $\text{O}_2$  para a respiração) ou resultar na formação de nitrosaminas, as quais são cancerígenas e mutagênicas

O local de redução do  $\text{NO}_3^-$  difere entre espécies de plantas. Em tomate, por exemplo, de 80-90% do N na seiva do xilema aparece como  $\text{N-NO}_3^-$ , indicando que a grande parte do nitrato absorvido é reduzido nas partes verdes da planta. Mas, outras espécies são capazes de reduzir o  $\text{NO}_3^-$  tanto nas folhas quanto nas raízes. De acordo com Pate (1971) citado por MENGEL & KIRKBY (1987) a proporção de  $\text{NO}_3^-$  reduzido nas raízes decrescentes na seguinte seqüência: Cebola > Milho > Girassol > Cevada > rabanete. Em folhas de árvores e arbustos, pouco ou nenhum  $\text{NO}_3^-$  é encontrado, indicando que a redução ocorre nas raízes.



**FIGURA 3.6** Grupos prostéticos da  $\text{RNO}_3^-$  e a seqüência de reações  
(Guerrero et. Al. 1981, em MENGEL & KIRBY, 1987).

**TABELA 3.3 Efeito do pré-tratamento com molibdênio sobre a atividade da Redutase do Nitrato em segmentos de folha de trigo**

Solução de crescimento ( $\mu\text{g Mo / planta}$ )	Pré-tratamento Segmento folhas ( $\mu\text{g Mo/l}$ )	Atividade $\text{RNO}_3^-$ ( $\mu\text{ mol NO}_2^-/\text{g mat. fresca}$ )	
		24 h	70 h
0,005	0	0,2	0,3
0,005	100	2,8	4,2
5,0	0	-	8,0
5,0	100	-	8,2

Fonte: Randall (1969), em MARCHNER (1986).

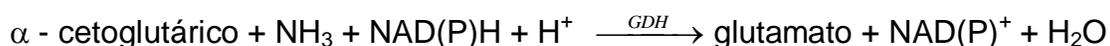
A redução do  $\text{NO}_2^-$  para  $\text{NH}_3$  é catalisada pela  $\text{RNO}_2^-$ , enzima contendo enxofre lábil (sulfeto) e dois átomos de Fe, associada aos cloroplastos nas folhas e aos plastídeos nas raízes. Os doadores de elétrons para a ferredoxina (Figura 3.5.), são nas folhas iluminadas, é o Fotossistema I e, no escuro, a respiração (MARSCHNER, 1986). Nas raízes, o doador de elétrons seria o NADPH reduzido nos plastídeos pela via oxidativa das pentoses-fosfato. Como nas raízes a ferredoxina é ausente, um composto desconhecido deve servir de carregador de elétrons entre o NADPH e a  $\text{RNO}_2^-$ . A equação geral da redução do nitrito é a seguinte:



Uma vez reduzido, o nitrogênio, agora sob a forma de  $\text{NH}_3$ , vai entrar no metabolismo gerando principalmente aminoácidos. Considera-se duas vias metabólicas através das quais o  $\text{NH}_3$  é assimilado:

- via desidrogenase glutânica (via GDH);
- via sintetase de glutamina/sintase de glutamato (via GS/GOGAT).

Via GDH – A Desidrogenase Glutânica (GDH) catalisa a reação reversível de aminação redutível do ácido  $\alpha$ -cetoglutárico:



A ação da enzima Sintetase da Glutamina (GS), catalisa a formação de Glutamina a partir do Glutamato, incorporando a este um  $\text{NH}_3$  com energia do ATP:



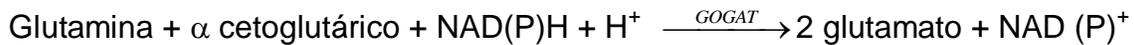
Deste modo, o  $\text{NH}_3$  incorpora-se no nitrogênio amídico da molécula.

Apenas a partir de 1970, pesquisas demonstraram que a via GDH não era única e

não desempenhava o papel principal na assimilação do nitrogênio.

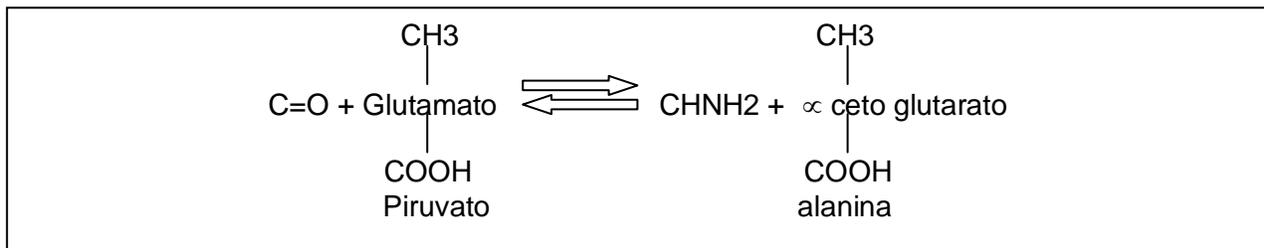
Via GS/GOGAT – nesta via a enzima GOGAT (Glutamina:  $\alpha$  ceto oxoglutarato aminotransferase) é capaz de catalisar a transferência redutiva do grupo N-amídico da glutamina para  $\alpha$  cetoglutárico, produzindo duas moléculas de glutamato:

Glutamina +  $\alpha$  ceto (oxoglutarato aminotransferase) é capaz de catalisar a transferência redutiva do grupo N-amídico da glutamina para  $\alpha$  cetoglutárico, produzindo duas moléculas de glutamato:



A via GS/GOGAT é preferencial para a introdução do  $\text{NH}_3$  em aminoácidos em plantas superiores. A via GDH que é simultânea à GS/GOGAT, passa a desempenhar papel importante quando as plantas são mantidas em excesso de  $\text{NH}_3$ .

Uma vez formado, o glutamato sofre a ação de enzimas chamadas aminotransferase ou transaminase, que transferem o grupo amino ( $-\text{NH}_2$ ) de um aminoácido para o grupo cetônico de ceto ácido, formando outros aminoácidos:



Da mesma forma:

oxaloacetato + glutamato  $\longrightarrow$  aspartato +  $\alpha$  ceto glutarato

glioxilato + glutamato  $\longrightarrow$  glicina +  $\alpha$  ceto glutarato

hidroxi-piruvato + glutamato  $\longrightarrow$  serina +  $\alpha$  ceto glutarato

A Figura 3.7. ilustra a assimilação do  $\text{NH}_3$  pelas vias GDH e GS/GOGAT e a ação das aminotransferases na formação de outros aminoácidos.

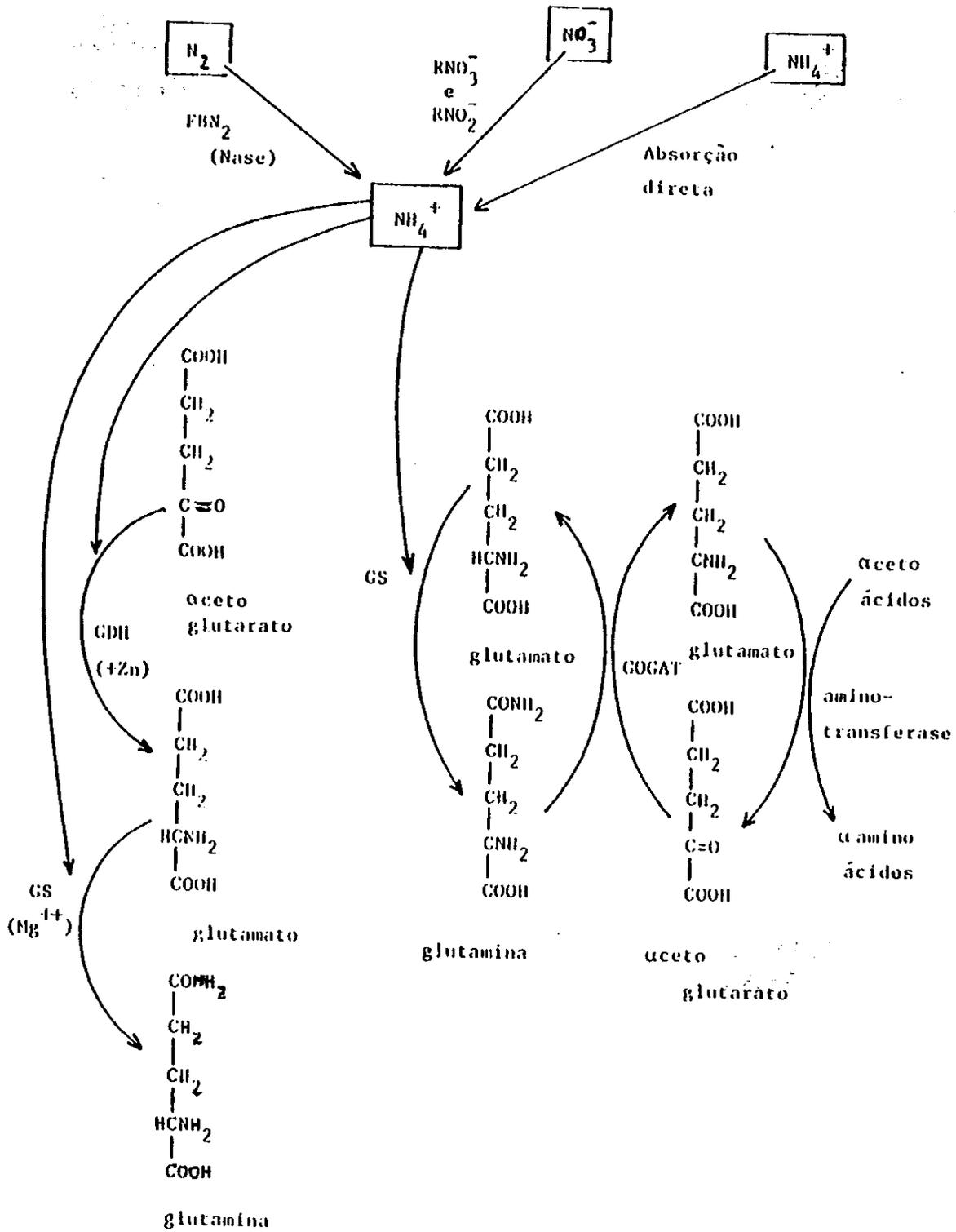
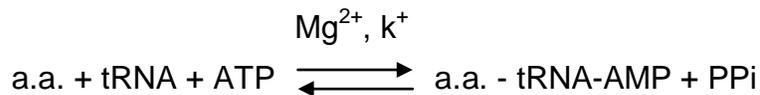


FIGURA 3.7 Vias bioquímicas de assimilação do NH<sub>3</sub> em plantas superiores (Adaptado de CROCOMO, 1979).

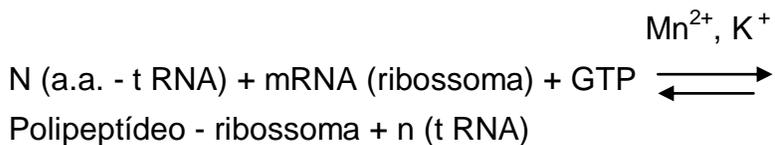
Uma vez formados os 20 ou 21 aminoácidos protéicos pode ocorrer a síntese de proteínas que se dá, resumidamente, em 3 passos a saber (MALAVOLTA, 1980):

1) ativação de aminoácido (a.a)

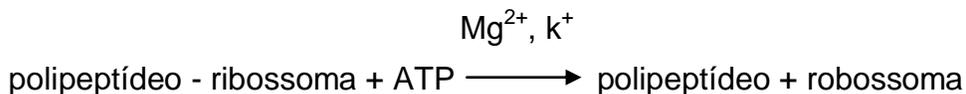


onde tRNA= ácido ribonucleico transferidor

2) união do a.a. - t RNA com mRNA ( mensageiro) = ligação peptídica (-NHCO-).



3) descolamento da cadeia peptídica



O processo ocorre nos ribossomas e exige: t RNA – transferidor, mRNA – mensageiro, ATP, GTP,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e os 20-21 aminoácidos para a formação dos polipeptídeos (proteínas). De acordo com o código do DNA, diferentes proteínas são sintetizadas.

As proteínas e aminoácidos não são os únicos compostos nitrogenados da planta; como já citado, outros mais existem como as bases nitrogenadas, coenzimas, pigmentos, vitaminas.

Na planta adulta as proteínas encontram-se em equilíbrio dinâmico, ou seja, estão sendo constantemente hidrolisadas (desdobradas) e sintetizadas de novo.

Sintomas de deficiência – O sintoma característico de deficiência de N nas plantas é uma clorose (= amarelecimento) que começa nas folhas mais velhas, permanecendo, inicialmente, as novas verdes em consequência da redistribuição

## FÓSFORO

- **Aspectos Gerais**

O fósforo (P) é, dos macronutrientes, um dos menos exigidos pelas plantas (ver Tabela 3.1.). Não obstante, trata-se do nutriente mais usado em adubação no Brasil. Nas regiões tropicais e subtropicais, como acontece no Brasil, é elemento cuja falta no solo

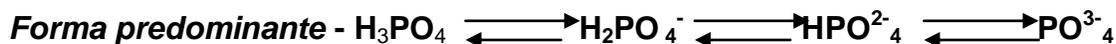
mais freqüentemente limita a produção, principalmente em culturas anuais: mais de 90% das análises de solo no Brasil mostram teores menores de P disponível. Além da carência generalizada de P nos solos brasileiros, o elemento apresenta forte interação com o solo (fixação), o que reduz a eficiência da adubação fosfatada.

No solo o P aparece na forma orgânica e mineral. O P orgânico ocorre em teores proporcionais à matéria orgânica. Vários compostos de fósforo foram identificados na matéria orgânica do solo, predominando os fosfatos de inositol, fosfolípidos e ácidos nucleicos. Na forma mineral, a proporção relativa dos compostos inorgânicos de fósforo, com ferro, alumínio e cálcio é condicionada pelo pH e pelo tipo e quantidade de minerais existentes na fração argila. Em solos ácidos, com predomínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, são mais importantes as combinações de P-Fe e P-Al, enquanto em solos neutros ou calcários aparece mais P-Ca.

- **Fósforo na Planta**

O P requerido para o ótimo crescimento das plantas varia, dependendo da espécie e do órgão analisado, de 0,1 a 0,5% na matéria seca. De maneira geral, sua exigência pelas plantas é menor que do N, K, Ca e Mg, igualando-se à do S.

Absorção, transporte e redistribuição – a equação abaixo ilustra as espécies iônicas, originadas do ácido ortofosfórico ( $H_3PO_4$ ), dependendo do pH do meio:



PH do meio -                      < 2,0                      2-7                      7 - 12                      > 12

Observa-se que na faixa de pH do solo (4 a 7), predomina a forma de  $H_2PO_4^-$ ; forma esta absorvida pelas raízes das plantas. Geralmente, a concentração de fosfato nas células radiculares e na seiva do xilema é de 100 a 1.000 vezes maior do que a da solução do solo (ver Tabelas 2.2 e 2.6). Isto ilustra que a absorção de fosfato dá-se contra um alto gradiente de concentração, portanto, absorvido ativamente. O  $Mg^{2+}$  apresenta um efeito sinérgico na absorção de P. As micorrizas, aumentando a superfície absorvente e o volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas – lembrando que o fósforo se move no solo por difusão – promove maior absorção do  $H_2PO_4^-$  (ver 2.1.6. h, Figura 2.20).

O fosfato absorvido pelas células é rapidamente envolvido em processos metabólicos; 10 minutos após a absorção do fosfato pela cevada, 80% do total absorvido foi incorporado a compostos orgânicos, basicamente formado por hexose-fosfato e uridina difosfato (MENGEL & KIRKBY, 1987).

O transporte no xilema ocorre principalmente na forma tal como foi absorvido ( $H_2PO_4^-$ ), podendo ainda aparecer na seiva do xilema como fosforil colina ou ésteres de carboidrato.

O fosfato é bastante móvel na planta sendo redistribuído com facilidade pelo floema, na forma de fosforil colina. Dados recentes mostram que P inorgânico (Pi) é presente também no floema em substancial concentração. Quando as plantas estão adequadamente nutridas em P, de 85% a 95% do P inorgânico total da planta está localizado nos vacúolos. Ocorrendo redução no suprimento de P para as plantas, este Pi sai do vacúolo e é redistribuído para os órgãos novos em crescimento. Dada a fácil redistribuição do fósforo na planta, os sintomas de deficiência manifestam-se inicialmente nas folhas mais velhas.

Formas de fósforo e funções na planta – O fósforo aparece nas plantas nas formas inorgânicas e orgânicas. Na forma inorgânica (Pi), aparece como ortofosfato e em menor quantidade como pirofosfato (P-P), e representam uma proporção relativamente alta em relação ao P total no tecido. É o que mostra a Tabela 3.4., sendo que nas folhas a proporção de Pi para o P orgânico é maior que nos grãos e dependente do estado nutricional da planta em fósforo. Em plantas com suprimento inadequado, os valores de Pi são diminuídos enquanto que os de P orgânico permanecem praticamente inalterados. A fitina é um composto de reserva de P em sementes, como será visto adiante.

**TABELA 3.4 Conteúdo de várias formas de fósforo em grãos de aveia e folhas de espinafre**

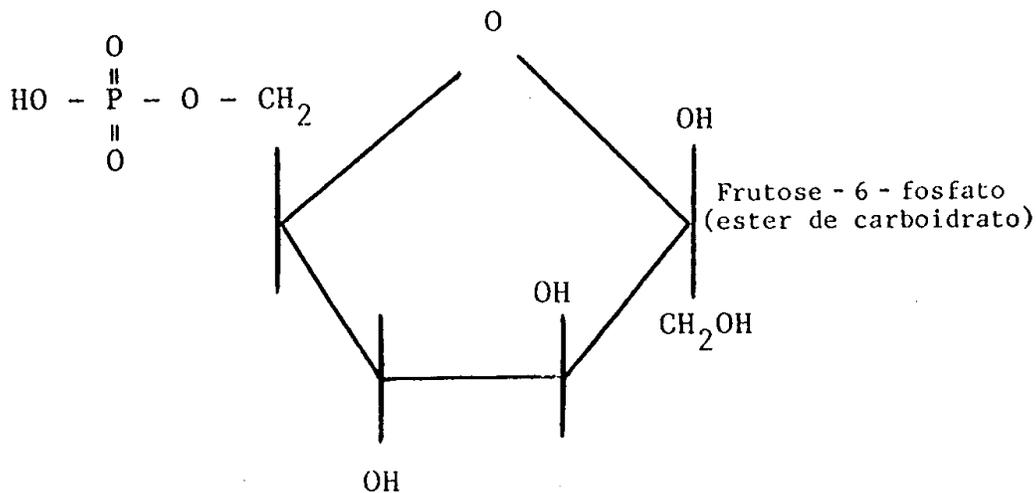
Suprimento De P	Fosfolípídeo	Ácidos Nucléicos	Fitina	P-inorgânico
	P em %0			
	Grãos de aveia			
Inadequado	0,22	2,1	0,05	0,5
Adequado	0,22	2,4	0,5	1,3
	Folhas de espinafre			
Inadequado	1,1	0,9	-	2,2
Adequado	1,1	0,9	-	18,0

Fonte: Michael (1939), em MNGEL & KIRKBY (1987).

O “pool” de Pi – o vacúolo é o compartimento de acúmulo – apresenta importante função no metabolismo da planta, principalmente no controle da atividade enzimática. A concentração de Pi no citoplasma é da ordem de 5 a 6 mM. Baixas concentrações citoplasmáticas reduzem o crescimento da planta e em concentrações de 0,3 mM ou menores, o crescimento é completamente inibido (MENGEL & KIRKBY, 1987). O Pi no citoplasma tem uma função regulatória da atividade de várias enzimas, por exemplo, a fosfofrutoquinase, enzima chave no fluxo de substrato na via glicolítica. Assim, um aumento na troca do Pi do vacúolo pode intensificar a respiração correlacionada com o amadurecimento de frutos. O atraso na maturação de frutos de tomate de plantas

deficientes em P pode estar relacionada a esta função do Pi. A concentração de Pi nos cloroplastos e no mitocôndria é também alta, na ordem de 10 mM (BIELESKI & FERGUSON, 1983). A enzima chave para a síntese de amido nos cloroplastos e amiloplastos, ADP-glucose pirofosforilase, é alostericamente inibida pelo Pi e estimulada por triosefosfato. A relação Pi/triosefosfato é que determina a taxa de síntese de amido nos cloroplastos. A concentração de Pi e triosefosfato nos cloroplastos é controlada por um “transportador de fosfato”, carregador específico localizado nas membranas da organela, que promove a troca  $\text{Pi} \rightarrow$  triose fosfato, entre o estroma e o citoplasma. Assim, a inibição da síntese de amido pela alta concentração de Pi nos cloroplastos é resultado também da diminuição da concentração de substrato (triosefosfato = gliceraldeído-3-fosfato e dihidroxicetona fosfato), que serve tanto para a estimulação da enzima quanto de substrato para a síntese de amido.

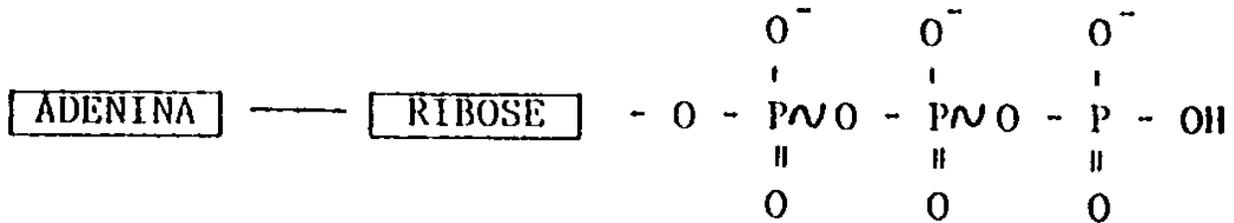
As formas orgânicas de fósforo na planta são compostos nos quais o ortofosfato é esterificado a hidroxilas de açúcares e álcoois, ou pirofosfato ligado a outro grupo fosfato. Um exemplo típico de ligação éster é a frutose -6-fosfato:



Mais de 50 compostos formados da esterificação de fosfato com açúcares e álcoois têm sido identificados, sendo que aproximadamente 10, incluindo glucose-6-fosfato e fosfogliceraldeído, são presentes em relativamente alta concentração na célula.

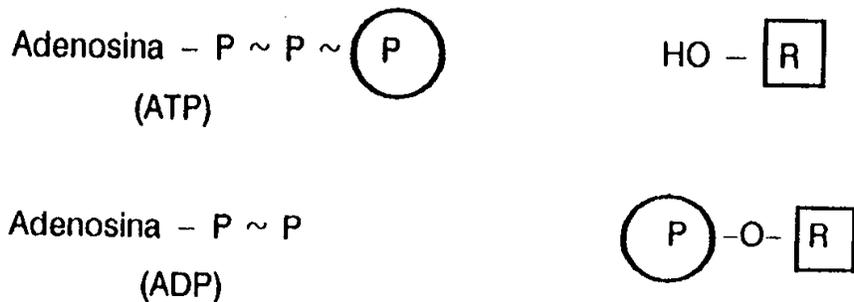
Nos fosfolipídeos, componentes essenciais das membranas biológicas (ver 2.1.3.), o fosfato encontra-se ligado aos compostos orgânicos por ligação diéster; por exemplo, a lecitina – fosfatilcolina.

O mais importante composto no qual o grupo fosfato serve para armazenar energia e depois transferi-la para a promoção de processos endergônicos é o trifosfato de adenosina, o ATP.



A energia armazenada nas ligações entre os fosfatos (~) se torna disponível quando ocorre a hidrólise de um ou dois radicais fosfatados terminais, que liberta 7.600 Kcal/mol.

A síntese das ligações altamente energéticas do ATP se processa nas reações de fosforilação, a glicose; oxidativa – associada ao transporte de elétrons na fase aeróbica da respiração, na cadeia respiratória; fotossintética – cíclica e acíclica, no transporte eletrônico na fotossíntese. A energia armazenada no ATP é utilizada nos processos endergônicos do metabolismo, citando-se como exemplo a absorção iônica ativa: síntese de vários compostos orgânicos como o amido, gorduras e proteínas. Nestes processos, normalmente ocorre uma reação inicial de fosforilação, que envolve a transferência do grupo fosforil do ATP para outro composto:



Assim o composto fosforilado é ativado e capaz de participar dos processos metabólicos. Em algumas reações de fosforilação o substrato liga-se com o ADP ou AMP, como no caso do ADP-glicose na síntese do amido e AMP-aminoácido, na ativação de aminoácidos na síntese de proteínas.

Embora o ATP seja o principal composto fosforilado rico em energia, a sua energia pode ser transferida para outras coenzimas, as quais diferem do ATP somente na base nitrogenada como, por exemplo, uridina trifosfato (UTP), guanosina trifosfato (GTP), citidina trifosfato (CTP), as quais são requeridas para a síntese de sacarose, celulose e fosfolípidos, respectivamente. Todos estes nucleotídeos trifosfatos (ATP, UTP, GTP, CTP e TTP-tiamina trifosfato) também são envolvidos na síntese dos ácidos nucléicos, o ácido ribonucléico (RNA) e o desoxiribonucléico (DNA). Os compostos que formam o fosfato orgânico indicam o universal e essencial papel do P não somente em plantas, mas também em todos os outros organismos vivos.

A reserva de fósforo em sementes e frutos são os fitasos (sais de Ca, Mg e K do ácido fitico = éster hexafosfórico ou inositol) e representam cerca de 50% do P total em

sementes de leguminosas e de 60 a 70% em grãos de cereais; em tubérculos de batata, representam de 15 – 3%. A função do fitato na germinação de sementes é óbvia. Nos estágios iniciais de crescimento das plântulas, o embrião tem um alto requerimento de nutrientes minerais, incluindo o Mg (necessário para as reações de fosforilação e síntese protéica), o K (requerido para a expansão celular) e o P (para formação dos fosfolipídeos das membranas celulares e ácidos nucléicos). A Tabela 3.5 ilustra bem a rápida degradação dos fitatos e, conseqüentemente, síntese de outros compostos fosforilados, durante a germinação de sementes de arroz. Nas primeiras 24 horas, a maior quantidade de P fitatos foi incorporada nos fosfolipídeos, indicando a síntese de membranas, essenciais para a compartimentalização e regulação dos processos metabólicos. O aumento dos níveis de Pi e éster de fosfato refletem uma intensiva respiração, fosforilação e processos relacionados. A degradação de fitatos continua com o tempo e, finalmente, os níveis de fósforo incorporados no DNA e RNA aumentam, indicando um aumento na síntese de proteínas e divisão celular.

**TABELA 3.5 Alterações nas frações de fósforo durante a germinação de sementes de arroz**

Germinação (horas)	Frações de fósforo (mg P / g mat.seca)				
	Fitatos	Lipídeos	Pi	Ester	RNA + DNA
0	2,67	0,43	0,24	0,078	0,058
24	1,48	1,19	0,64	0,102	0,048
48	1,06	1,54	0,89	0,110	0,077
72	0,80	1,71	0,86	0,124	0,116

Fonte: Mukherjl et al. (1971), em MARSCHNER (1986).

Sintomas de deficiência – devido aos papéis do P na vida da planta, participando da síntese e degradação de macromoléculas – amido, gorduras, proteínas e de outros inúmeros processos metabólicos, como já descritos, a sua carência se reflete no menor crescimento das plantas. Como o P se redistribui facilmente na planta, os sintomas da deficiência, inicialmente, ocorrem nas folhas mais velhas. Estas podem mostrar uma cor amarelada, pouco brilho, cor verde-azulada; em algumas espécies pode ocorrer uma tonalidade arroxeada como, por exemplo, no milho.

## POTÁSSIO

Embora o K<sup>+</sup> seja, de maneira geral, o segundo nutriente mais exigido pelas culturas (Tabela 3.1.), o mesmo não se encontra nos solos em teores tão limitantes quanto o de fósforo. É, depois do fósforo, o nutriente mais consumido como fertilizante pela agricultura brasileira.

A principal forma de K nos solos é a mineral, encontrado na rede cristalina de minerais primários – feldspatos, micas como a muscovita e biotita – e nos minerais

secundários – argilas do tipo 2:1, ilita e vermiculita. O grau de intemperismo do solo afeta os minerais e as formas existentes no solo. Em solos muito intemperizados esses minerais são menos comuns, dando lugar à caulinita que não tem K na sua estrutura.

Além do K estrutural dos minerais, o nutriente aparece no solo na forma de cátion trocável e na solução do solo, formas tidas como disponíveis para as plantas. Os teores trocáveis, em geral, pouco representam em relação aos teores totais. Contudo, em solos muito intemperizados, como é o caso de vastas regiões brasileiras, eles podem ser a reserva mais importante do potássio disponível.

A matéria orgânica do sol, além de possuir o K trocável, apresenta o nutriente no seu interior, o qual é liberado por lavagem e no processo de mineralização.

Admitindo-se que 45 ppm de K no solo indiquem um conteúdo baixo para as plantas, segundo MALAVOLTA (1980), as análises de solo feitas em diferentes regiões do país mostram as seguintes percentagens de valores aquém desse limite: Amazônia – 40; Nordeste – 30; Centro – 40; Sul – 10. Por estes dados verifica-se que a pobreza em K dos solos brasileiros não é tão freqüente quanto a de fósforo.

### **Potássio na planta**

O requerimento de K para o ótimo crescimento das plantas está aproximadamente entre 2 a 5% na matéria seca, variando em função da espécie e do órgão analisado. O potássio é o segundo nutriente mais exigido pelas plantas, perdendo apenas para o N; as plantas produtoras de amido, açúcar e fibras parecem ser particularmente exigentes em potássio (Tabela 3.1.).

*Absorção, transporte e redistribuição* – O potássio na solução do solo aparece na forma iônica,  $K^+$ , forma esta absorvida pelas raízes das plantas. Concentrações elevadas de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  reduzem a absorção do potássio por inibição competitiva; embora baixas concentrações de Ca apresenta um efeito sinérgico ( Tabela 2.8 e Figura 2.14).

O K é bastante permeável nas membranas plasmáticas e isto o torna facilmente absorvido e transportado a longa distância pelo xilema e pelo floema. Grande parte do K total da planta está na forma solúvel ( mais de 75%), portanto, a sua redistribuição é bastante fácil no floema. Desta forma, sob condições de baixo suprimento de K pelo meio, o elemento é redistribuído das folhas mais velhas para as mais novas e para as regiões em crescimento. Assim, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas velhas.

*Funções do potássio* – O K faz parte de nenhum composto orgânico, portanto, não desempenha função estrutural na planta. No floema, o K é o cátion mais abundante, em concentrações aproximadamente iguais a do citoplasma; neste, a concentração mantém-se em uma relação relativamente estreita, de 100 a 120 mM, enquanto nos cloroplastos é mais variável, de 20 a 200 nM (MARCHNER,1986). Estas altas concentrações são requeridas para a neutralização de ânions insolúveis e solúveis (p.ex: ânions de ácido orgânicos e ânions inorgânicos) e para estabilizar o pH nestes compartimentos entre 7 e 8, pH este ótimo para as reações enzimáticas. O K contribui também para a regulação

---

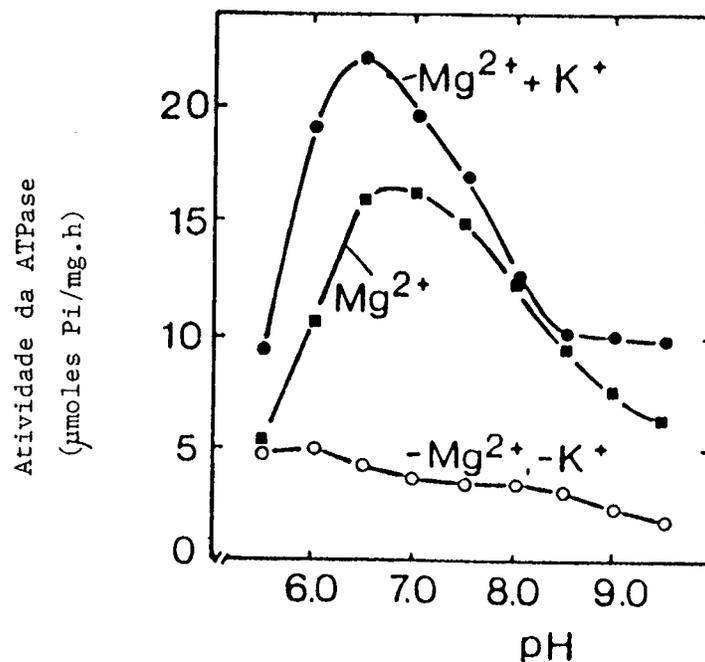
osmótica da planta. Além destas funções, o  $K^+$  atua na ativação enzimática e no processo de absorção iônica.

As principais funções do K na vida da planta são descritas a seguir:

**Ativação enzimática** - a principal função bioquímica do K é ativação enzimática. Mais de 50 enzimas são dependentes do K para sua atividade normal, citando-se as sintetases, oxiredutases, desidrogenases, transferases e quinases. Altas concentrações de K são necessárias para induzir as variações conformacionais e otimização do grau de hidratação da proteína enzimática e, portanto, máxima ativação enzimática. Como visto, altas concentrações de potássio são encontradas no citoplasma e nos cloroplastos de plantas bem nutridas em K. Em geral, a mudança conformacional das enzimas induzidas pelo  $K^+$ , aumenta a taxa de atividade,  $V_{max}$ , e em alguns casos também a afinidade para com o substrato,  $K_m$ .

Em plantas deficientes em K, algumas mudanças químicas são observadas, incluindo a acumulação de carboidratos solúveis, decréscimo no nível de amido e acúmulo de compostos nitrogenados solúveis. No metabolismo de carboidratos, enzimas como a 6-fosfofrutoquinase e a piruvato quinase, que atuam na via glicolítica, apresentam um alto requerimento de K; a sintetase do amido é também altamente dependente de cátions monovalentes, dentre os quais o K é o mais eficiente.

As ATPases ligadas às membranas celulares, que atuam no processo de absorção iônica ( ver 2.1.3), requerem para sua máxima atividade o  $Mg^{2+}$  e o  $K^+$ , como mostra a Figura 3.8.

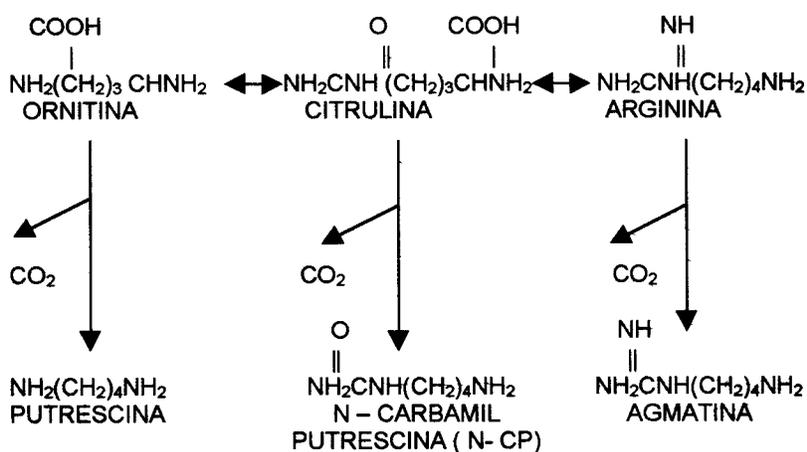


**FIGURA 3.8** Atividade de ATPase de fração de membrana de raízes de milho, influenciada pelo pH, Mg e K

(Leonard & Hotchris, 1976, em MARCHNER, 1986).

Está bem estabelecido que o  $K^+$  é requerido para a síntese protéica em plantas (ver pág.85). Plantas deficientes em K apresentam menor síntese de proteínas e acúmulos de compostos nitrogenados solúveis como, por exemplo, aminoácidos, amidas e nitrato. É bastante provável que o K, além de enviar redutase do nitrato, também seja requerido para a síntese desta enzima (MARCHNER,1986).

Tem sido atribuído ao potássio um efeito indireto no acúmulo de putrescina em tecidos de plantas deficientes em K. A putrescina, composto fitotóxico na planta, tem origem em aminoácidos básicos (ornitina, citrulina e arginina), como mostra a Figura 3.9. Em plantas deficientes em K, ocorre redução na síntese protéica e acúmulo dos aminoácidos básicos, levando a um grande aumento no teor de putrescina (Tabela 3.6). Nas regiões lesadas (clorose e necrose), nas bordas e pontas das folhas mais velhas, sintoma típico de deficiência de K em plantas, ocorre um acúmulo de putrescina.



**FIGURA 3.9** Formação de diaminas a partir da descarboxilação de aminoácidos do ciclo ornitina-uréia

(MALAVLOTA & CROCOMO,1982).

**TABELA 3.6** Aminoácidos, aminas, N total, proteínas e potássio em folhas de gergelim (38 dias de idade) influenciadas pelo nível de K

Componente	Mmol.g ms,		Componente	% relação m.s/	
	+ K	-K		+K	-K
Arginina	72	115	N Total	1.6	2.8
Citrulina	118	377	Potássio	3.0	0.5
Agmatina	45	117	Proteína *	572.0	235.0
N- carbamiputrescina	26	92		* mg proteína/ 100mg N total	
Putrescina	114	1000			

Fonte: Crocomo e Basso (1974), em MALAVOLTA & CROCOMO (1982).

As enzimas que catalisam a síntese das aminas são estimuladas por um baixo no suco celular. Considerando, como visto, que o  $K^+$  tem um papel importante na manutenção do pH elevado no citoplasma, parece que o aumento na síntese de putrescina é um reflexo de um mecanismo homeostático o qual é controlado pelo pH; em condições drásticas de deficiência de K, o teor de putrescina chega a superar 1% ( com base na matéria-seca), representando 10% do N total.

**Osmorregulação** – a nutrição potássica também está ligada à regulação do potencial osmótico das células das plantas. A expansão celular e a abertura e fechamento dos estômatos dependem de um ótimo celular e, para tal, o K é indispensável.

Para que haja a alongação normal das células meristemáticas das plantas é necessário o afrouxamento da parede celular, provavelmente induzido pelo AIA (Ácido Indol Acético) e um acúmulo de soluto (K e açúcares redutores) no vacúolo para criar um potencial osmótico interno. O processo é iniciado pela ATPase localizada na plasmalema (ativada pelo  $K^+$ ) que bombeia o  $H^+$  do citoplasma para o apoplasto e resulta na ativação de enzimas hidrolisantes e, conseqüentemente, afrouxamento da parede celular. Este afrouxamento e o aumento da pressão de turgor, promovido pela absorção de água em resposta à diminuição do potencial osmótico pela absorção do K, são pré-requisitos para o crescimento celular.

Os fitohormônios envolvidos com o crescimento dos tecidos meristemáticos, apresentam um efeito sinérgico com o K, como mostrado para o AIA no crescimento de coleóptilos de milho, para o ácido giberético no crescimento de plântulas de girassol e para as citocininas no crescimento de curcubitáceas. Estes exemplos mostram que o K tem um papel fundamental no crescimento meristemático. O pequeno crescimento de plantas deficientes em K está, obviamente, diretamente relacionado com o efeito do K sobre a ATPase da plasmalema dos tecidos meristemáticos (MENGEL & KIRKBY, 1987).

A baixa perda de água pelas plantas bem supridas em K é devido à redução na taxa de transpiração, a qual não depende somente do potencial osmótico das células do mesófilo, mas também é controlada pela abertura e fechamento dos estômatos. O acúmulo de K nas células-guardas induzido pela luz, é mediada por uma bomba de  $H^+$  (ATPase), tal como ocorre em outras membranas celulares. A energia requerida para o processo é suprida pela fotofosforilação nos cloroplastos das células guardas. Um aumento na concentração de K nas células guardas resulta na absorção de água das células adjacentes e um conseqüente aumento na pressão de turgor, promovendo assim, a abertura dos estômatos.

A fotossíntese também é afetada pela abertura e fechamento dos estômatos; faltando  $K^+$  os estômatos não se abrem regularmente, há menor entrada de  $CO_2$  e, portanto, menor intensidade fotossintética.

Também tem sido atribuído à nutrição potássica a tolerância das plantas à seca e à geada, pelos mesmos motivos acima discutidos – diminuição no potencial osmótico do suco celular e maior absorção de água.

---

Fotossíntese e transporte de carboidratos – tem sido reportado um efeito direto do K sobre a taxa de assimilação do CO<sub>2</sub>. Além da regulação da abertura e fechamento dos estômatos, o K<sup>+</sup> estaria também envolvido em uma melhor difusividade do CO<sub>2</sub> no mesófito; estímulo na atividade da ribulose bifosfato caboxilase (RuBP), possivelmente, devido à manutenção de um pH ótimo para a atividade da enzima. Um efeito benéfico do K<sup>+</sup> na fofosforilação também tem sido citado: o K<sup>+</sup> promoveria, possivelmente, uma desporalização das membranas dos tilacoídes, favorecendo assim o fluxo de elétrons nos fotossistemas I e II.

O carregamento e descarregamento do floema em fotossintatos é um processo ativo, requer energia do ATP e envolve ATPases associadas às membranas. Admite-se que o K<sup>+</sup> esteja diretamente envolvido neste processo, possivelmente pela desporalização da membrana plasmalema e ativação das ATPases.

Muitos trabalhos têm mostrado que o K<sup>+</sup> aumenta o transporte de fotossintatos pelo floema como mostra a Tabela 3.7. Em plantas de cana de açúcar bem nutridas em K, o transporte de compostos – <sup>14</sup>C das folhas (fonte) para os colmos (órgão armazenador) é mais rápido e em maior quantidade. O transporte de outros compostos, além dos fotossintatos, também é favorecido pelo K, assim como o de proteínas e outros compostos nitrogenados. Portanto, o K favorece o carregamento e descarregamento e o transporte dos compostos no floema.

**TABELA 3.7 Migração de fotossintatos – <sup>14</sup>C em cana de açúcar bem (+K) e mal (-K) nutrida em potássio**

Parte da Planta	% da marcação total	
	+ K	- K
Limbo da folha alimentada com <sup>14</sup> CO <sub>2</sub>	54,3	95,4
Bainha da folha alimentada com <sup>14</sup> CO <sub>2</sub>	14,2	3,9
Ponto de inserção da folha alimentada	9,7	0,6
Folhas e pontos de inserção acima desta folha	1,9	0,1
Porção do colmo abaixo do ponto de inserção	20,1	0,04

Fonte: Hartt (1969), em MARSCHNER (1986).

Sintomas de deficiência – devido à mobilidade do K nos tecidos, os sintomas de deficiência ocorrem em primeiro lugar nas folhas mais velhas, com uma clorose seguida de necrose nas pontas e margens das folhas; nas regiões lesadas há acúmulo de putrescina.

## CÁLCIO

O cálcio, o magnésio e o enxofre são conhecidos como macronutrientes secundários. Do ponto de vista da nutrição mineral das plantas, nenhum nutriente pode ser considerado secundário. Na adubação, os três são realmente secundários, por se

constituírem componentes de fertilizantes e corretivos, que são comercializados por seu conteúdo em NPK ou por sua capacidade corretiva. Por isso, não são valorizados diretamente.

O Ca no solo tem sua origem primária nas rochas ígneas, estando contido em minerais como a dolomita, calcita, feldspatos, cálcicos e anfibólios, que ocorrem também em rochas sedimentares e metamórficas. Em solos ácidos das regiões úmidas, estes minerais são intemperizados e o cálcio, em parte, é perdido por lixiviação. O Ca que fica no solo encontra-se adsorvido nos colóides do solo ou componentes da matéria orgânica. Sob condições de solo com pH elevado, o Ca pode insolubilizar-se como carbonatos, fosfatos ou sulfatos. O Ca considerado disponível para as plantas é aquele adsorvido aos colóides (troçável) e presente na solução do solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução de solos ácidos são bastante baixos.

### **Cálcio na Planta**

O Ca é um nutriente exigido em quantidades muito variadas em diferentes culturas, variando, dentro de limites, de cerca de 10 até 200 kg/ha de Ca, sendo mais exigido pelas dicotiledôneas do que pelas monocotiledôneas. Os teores de Ca nos tecidos foliares também variam amplamente entre diferentes espécies, desde menos de 0,4 até cerca de 4%, para culturas normais.

A deficiência de Ca é rara sob condições de campo, exceto no caso de culturas com exigências especiais, como exemplo o tomate, maçã, amendoim, citros etc.

Absorção, transporte e redistribuição – o cálcio é absorvido pelas raízes como  $\text{Ca}^{2+}$  na solução do solo. Geralmente, a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução do solo é bem maior que a de  $\text{K}^{+}$  (Tabela 2.6); entretanto, a taxa de absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  é normalmente menor do que aquela observada para o  $\text{K}^{+}$ . Isto é devido ser  $\text{Ca}^{2+}$  absorvido apenas pelas extremidades das radículas radiculares, onde as paredes celulares da endoderme não foram ainda suberizadas (estrias de Caspari, Figura 2.27). A presença de outros cátions em altas concentrações, tal como o  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{NH}_4^{+}$ , diminuem competitivamente a absorção do  $\text{Ca}^{2+}$ .

O Ca é transportado unidirecionalmente pelo xilema, via corrente transpiratória, das raízes para a parte aérea. As reações de troca no xilema são muito importantes para o movimento ascendente do Ca na planta: o  $\text{Ca}^{2+}$  é deslocado dos sítios de troca por outros cátions.

A taxa de redistribuição do Ca é muito pequena devido sua concentração no floema ser muito baixa. A Tabela 3.8 mostra que ao contrário do observado para o K, a maior parte do Ca do tecido vegetal está em formas insolúveis em água. Estas formas são representadas por pectatos de cálcio, a principal substância de lamela média na parede celular, e sais cálcicos de baixa solubilidade tais como carbonato, sulfato, fosfato, silicato, citrato, malato, oxalato. A baixa solubilidade dos compostos de Ca da planta e a baixa concentração no floema explicam, em parte, a pequena redistribuição do elemento em

condições de carência, o que provoca o aparecimento dos sintomas em órgãos e partes mais novas: gemas e pontas das raízes. Os sintomas que aparecem em frutos de tomate (podridão apical), maçã (bitter pit), melancia etc, é devido a estes tecidos serem supridos por Ca pela corrente transpiratória, que transporta o nutriente diretamente da solução do solo. Se a concentração de Ca na seiva do xilema for baixa ou a taxa de transpiração do fruto for pequena, como ocorre sob condições de baixa umidade no solo, ocorre uma competição pelo Ca entre as folhas – que transpiram mais – e os frutos e, assim, um inadequado nível do nutriente atinge os frutos, resultando em sintomas de deficiência. Frutos e órgãos de reserva que crescem no solo, como o amendoim, batata, aipo, etc, não são supridos em Ca pela corrente transpiratória e, por esta razão, devem absorver o Ca que necessitam diretamente do solo. A prática de pulverização de produtos contendo Ca, diretamente aos frutos de tomate e maçã nas fases críticas de crescimento, são bastante comuns, reduzindo ou evitando problemas de deficiência do elemento. Um bom exemplo deste fato é mostrado na Tabela 3.9 para a maçã. Para o amendoim, também é encontrada a recomendação de cobertura com gesso – sulfato de cálcio – como suplementação de Ca na área de formação do esporão (ginóforo), logo depois do início do florescimento.

**TABELA 3.8 Solubilidade dos macronutrientes catiônicos, contidos na planta**

PLANTAS	POTÁSSIO			CÁLCIO			MAGNÉSIO		
	% Solúvel			% Solúvel			% Solúvel		
	%TOTAL	H <sub>2</sub> O	HCl 1%	%TOTAL	H <sub>2</sub> O	HCl 1%	%TOTAL	H <sub>2</sub> O	HCl 1%
ALFAFA									
Parte aérea	1,42	83	100	1,29	40	97	0,31	81	100
TRIGO									
Folhas	2,14	81	98	1,68	1,8	43	0,77	30	91
Caules	6,51	82	92	0,81	2,5	84	0,28	39	93
MILHO									
Parte aérea	5,33	89	100	0,67	65	100	0,41	81	100
CEBOLA									
Parte aérea	4,83	83	100	1,18	28	100	0,35	63	100
ERVILHA									
Parte aérea	3,07	95	100	1,79	59	100	0,47	72	100
BATATA									
Parte aérea	5,92	88	96	1,30	4,6	69	0,39	64	100
ABOBRINHA									
Parte aérea	2,34	97	100	3,51	23	88	0,65	31	100
TOMATEIRO									
Parte aérea	5,44	94	10	2,35	7,7	56	0,56	55	89
NABO									
Parte aérea	3,28	90	100	2,46	58	100	0,51	67	90

FONTE: MALAVOLTA (1980).

**TABELA 3.9 Efeito da pulverização de cálcio durante a estação de crescimento sobre o conteúdo de cálcio e percentagem de perda de frutos de maçã durante o armazenamento**

Parâmetro	Perda (%)	
	Não pulverizado	Pulverizado
Conteúdo (mg Ca/100 g mat. Fresca)	3,35	3,90
Danos de armazenagem		
Mancha da casca	10,4	0
Senescência precoce	10,9	0
“bitter-pit”	30,0	3,4
Podridão por <i>Gloesporium</i>	9,2	1,7

1/ Pulverização com Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> a 1% por 4 vezes durante a estação de crescimento.

Os frutos foram armazenados por 3 meses a 3-5% C.

Fonte: Sharpless & Johnson (1977), em MARSCHNER (1986).

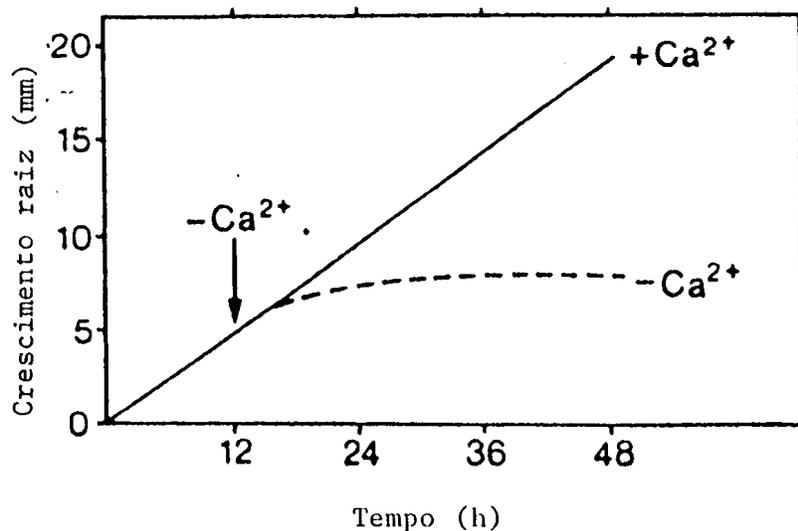
Funções do cálcio – ao contrário dos outros macronutrientes, uma alta proporção do Ca na planta encontra-se nas paredes celulares (apoplasto). Este fato é devido ao Ca integrar a lamela média das paredes celulares, formando ligações entre os grupos carboxílicos (R – COO<sup>-</sup>) dos ácidos poligalacturônicos, com a formação dos pectatos de cálcio. Nas dicotiledôneas, as quais apresentam maior CTC na parede celular sob condições de menor suprimento de Ca, mais de 50% do Ca total está ligado aos pectatos. Em tecidos dos frutos de maçã, a fração de Ca ligada à parede celular pode atingir valores superiores a 90% do total. A superfície externa da plasmalema é outro local de acúmulo de Ca, devido ao seu papel na manutenção da estrutura e funcionamento das membranas celulares, fato já bem discutido no item 2.1.5. Estudos têm mostrado que o Ca está localizado especialmente na região entre o citoplasma e a parede celular, indicando alto conteúdo do nutriente na plasmalema. A remoção do Ca da plasmalema pelo tratamento com EDTA, aumenta a permeabilidade da membrana e os íons inorgânicos e compostos orgânicos podem difundir do interior da célula para o apoplasto. A degradação dos pectatos é mediada pela ação da enzima poligalacturonase, a qual é drasticamente inibida por elevadas concentrações de Ca. Concordando com este fato, em plantas deficientes em Ca a atividade da poligalacturonase é aumentada e o típico sintoma da deficiência do elemento é a desintegração da parede celular e um colapso nos tecidos dos pecíolos e das partes mais novas do caule.

O Ca também é requerido para a alongação e divisão celular e isto se reflete drasticamente no crescimento radicular; na ausência do suprimento exôgeno de Ca, o crescimento radicular cessa em poucas horas, como mostra a Figura 3.10. Este aspecto toma uma conotação prática muito importante para o crescimento radicular na subsuperfície de solos ácidos, como ocorre em solos sob cerrado, onde o calcário aplicado na superfície não corrige os problemas da acidez em profundidade. Como o Ca é

imóvel nos tecidos das plantas, o Ca absorvido pelas raízes na camada superficial do solo corrigida pelo calcário, não é mobilizado para as raízes mais profundas, resultando no crescimento radicular superficial no solo, tornando as plantas bastante sensíveis aos veranicos, comuns na região dos cerrados. O menor crescimento das raízes nestas condições, além do Ca, a toxidez de  $Al^{3+}$  ocupa também um lugar de destaque. Para a correção destes problemas o uso do gesso parece, atualmente, a prática mais indicada.

Ao contrário do que acontece nas paredes e nas membranas celulares, a concentração de Ca no citoplasma e nos cloroplastos é baixa. A manutenção desta baixa concentração é de vital importância para a célula da planta, pois é agora evidente que o Ca inibe a atividade de várias enzimas localizadas no citoplasma e também previne a precipitação do fosfato inorgânico como fosfato de cálcio e a competição com o  $Mg^{2+}$  por sítios de ligação. A mais importante função do Ca citoplasmático é a sua participação na forma ativa da coenzima calmodulina, que é exigida para a atividade de uma série de enzimas como a fosfolipase, nucleotídeo fosfodiesterase, NAD-quinase, ATPase-Ca de membranas. Há evidências que a calmodulina está também envolvida na síntese da  $\alpha$  amilase. A conformação ativa da calmodulina é adquirida quando ligada a quatro átomos de Ca.

O Ca também é indispensável para a germinação do grão de pólen e para o crescimento do tubo polínico o que pode ser devido ao seu papel na síntese da parede celular ou ao funcionamento da plasmalema. Na fixação biológica do  $N_2$  por leguminosas, a nodulação das raízes necessita mais Ca que a própria planta; uma vez formados os nódulos o processo de fixação e o crescimento da planta ocorrem normalmente em concentrações relativamente baixas do elemento.



**FIGURA 3.10** Efeito do cálcio no crescimento de raízes primárias do feijão ( $Ca^{2+}$  na solução =  $\pm 2$  mM)

(Marschner & Richter, 1974, em MARSCHNER, 1986).

Sintomas de deficiência – como o Ca é imóvel na planta, esta exige um suprimento constante do elemento o que é feito mais eficientemente pelo solo. Quando o suprimento não for adequado, os sintomas de deficiência se expressam nos pontos de crescimento da parte aérea e da raiz e em frutos em desenvolvimento. As regiões em maior expansão celular na planta são as mais afetadas pela deficiência de Ca. Os sintomas podem apresentar-se como deformações nas folhas novas, clorose ou queimadura de uma região limitada nas margens destas folhas, morte das emas apicais e extremidade das raízes. Em algumas espécies os frutos são os mais afetados, como exemplos a podridão estilar no tomate e melancia, “bitter pit” na maçã, chochamento do amendoim, rachadura na raiz de cenoura e escurecimento interno em caule de repolho.

## MAGNÉSIO

O Mg, também tido com um macronutrientes secundário, tem sua origem primária em rochas ígneas e os principais minerais que o contêm são a biotita, dolomita, clorita, serpentina e olivina, componentes também de rochas metamórficas e sedimentares. O Mg faz parte da estrutura de minerais de argila, correndo em illita, vermiculita e montmorilomita. Quanto mais intemperizado o solo, menor ocorrência destes minerais, até que reste somente o Mg trocável adsorvido aos colóides e componentes da matéria orgânica do solo. As formas trocável e na solução são as consideradas disponíveis às plantas.

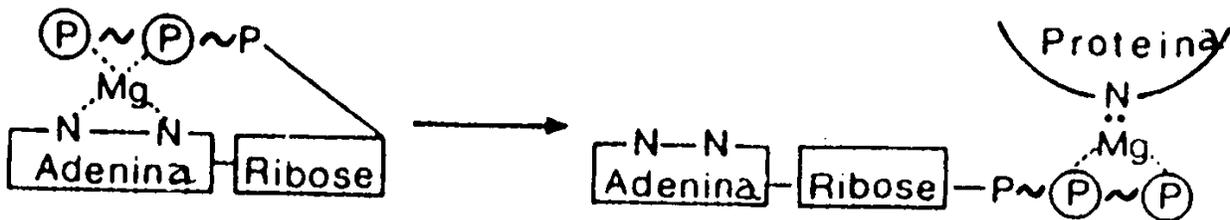
### Magnésio na Planta

As exigências das culturas em Mg são relativamente baixas, da ordem de 10 a 40 kg/ha para a maior parte dos casos; os teores nas folhas das plantas normais varia pouco entre as espécies, estando em geral na faixa de 0,2 a 0,4%. Como o magnésio não é um nutriente normalmente usado em adubações e sim nas calagens, não há muitos dados de respostas de culturas a magnésio. Contudo as deficiências têm ocorrido com uma certa frequência em solos ácidos, sendo agravados em culturas que recebem aplicações elevadas de potássio.

Absorção, transporte e redistribuição – as plantas absorvem o magnésio da solução do solo na forma de  $Mg^{2+}$  na solução do solo é maior do que a do  $K^+$  é reduzida por altas concentrações de outros cátions como o  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $NH_4^+$ , devido à inibição competitiva. Esta competição pode levar à deficiência do elemento nas plantas. A deficiência de Mg induzida pelo excesso de K na adubação é bastante comum em culturas como a bananeira e o cafeeiro – muito exigentes em K – em que as fórmulas empregadas são muito ricas em potássio. Em solos ácidos, além da pobreza natural em Mg, a absorção do elemento é diminuída pelo  $H^+$  e pelo  $Al^{3+}$  que aparecem em maiores concentrações nestas condições. O transporte do  $Mg^{2+}$  das raízes para a parte aérea ocorre pelo xilema via corrente transpiratória, basicamente na forma como foi absorvido –  $Mg^{2+}$ . Ao contrário do que se dá com o  $Ca^{2+}$  e de modo semelhante ao que ocorre com o  $K^{2+}$ , o  $Mg^{2+}$  é

móvel no floema. Grande parte do Mg da planta encontra-se na forma solúvel (Tabela 3.8), por isso, é facilmente redistribuído nas plantas. Portanto, sob condições de carência, os sintomas de deficiência do elemento ocorrem nas folhas mais velhas.

Funções do Magnésio – nos tecidos das plantas uma alta proporção do Mg total – cerca de 70% - encontra-se na forma difusível e associado com ânions inorgânicos e orgânicos como o malato e citrato. Também encontra-se associado a ânions indifusíveis como o oxalato e pectato. A função mais conhecida do Mg é a de compor a molécula da clorofila, que são porfirinas magnesianas; o Mg corresponde a 2,7% do peso das mesmas e representa cerca de 15 a 20% do Mg total das folhas das plantas. Além desta, outras importantes funções são desempenhadas pelo Mg, como a ativação enzimática; o Mg ativa mais enzimas de qualquer outro elemento na planta. Neste caso, o principal papel do Mg é atuar como cofator de enzimas fosforilativas, formando uma ponte entre o pirofosfato do ATP ou ADP e a molécula da enzima:



O substrato para muitas ATPases é o Mg – ATP. Um exemplo do requerimento de  $Mg^{2+}$  por ATPases de membrana é mostrado na Figura 3.8. Fica bastante evidente que o Mg – ATP é um substrato melhor que o ATP para a atividade de ATPases das membranas das raízes do milho. A máxima atividade requer também a presença do K. A síntese de ATP pelo processo da fosforilação ( $ADP + P_i \longrightarrow ATP$ ) tem um essencial requerimento de Mg para a ligação entre o ADP e a enzima. Isto explica a alta concentração de Mg nos cloroplastos e nos mitocôndrios, onde ocorre as reações de síntese de ATP pela fotofosforilação e fosforilação oxidativa, respectivamente. A Tabela 3.10 mostra o efeito do  $Mg^{2+}$  e do  $Ca^{2+}$  no meio sobre a fotofosforilação; o  $Ca^{2+}$  inibiu severamente o processo. Por isso “in vivo” as plantas mantêm baixa concentração de Ca nos cloroplastos. Outras enzimas importantes também são ativadas pelo  $Mg^{2+}$  pelo  $Mg^{2+}$  citando-se as desidrogenases e a enolase. Nestas enzimas, entretanto, o Mg não é específico para a reação e o  $Mn^{2+}$  é, muitas vezes, um ativador mais eficiente. A atividade da RuBP carboxilase também depende de  $Mg^{2+}$  e da elevação do pH do estroma dos cloroplastos para 7,5 – 8,0. O efeito favorável do  $Mg^{2+}$  sobre a assimilação do  $CO_2$  e dos processos relacionados, como a produção de açúcar e do amido são, provavelmente, conseqüência da ativação da RuBP carboxilase.

**TABELA 3.10 Efeito do  $Mg^{2+}$  e do  $Ca^{2+}$  no meio de incubação sobre a fosforilação em cloroplastos isolados de ervilha**

Cátions <sup>(1)</sup>	Taxa de fotofosforilação ( $\mu$ ml ATP/mg clorofila x h)
Ausente	12,3
$Mg^{2+}$	34,3
$Ca^{2+}$	4,3

O meio de incubação continha ADP + Pi e o cátion indicado.

Fonte: Lin & Nobel (1971), em MARSCHNER (1986).

Em plantas deficientes em Mg, geralmente, a relação de N – protéico / N – não protéico decresce. O Mg parece estabilizar a configuração das partículas do ribossoma necessária para a síntese protéica. Como visto no item referente às funções do Nitrogênio, nos passos para a síntese protéica, (ver pág. 111), a ativação dos aminoácidos, preliminar obrigatória no processo, exige Mg; a transferência dos aminoácidos ativados para formar a cadeia polipeptídica ou protéica também necessita de Mg. Uma outra enzima importante no metabolismo do N, a síntese do glutamato (GS), que atua na importante via de assimilação da  $NH_3$  – GS/GOGAT – também é ativada pelo  $Mg^{2+}$  nos cloroplastos (ver Figura 3.7).

Assim, o Mg participa de uma série de processos vitais da planta que requerem e fornecem energia como a fotossíntese, respiração, síntese de macromoléculas – carboidratos, lipídeos, proteínas – e absorção iônica.

Sintomas de deficiência – como a maior parte do Mg na planta encontra-se na forma difusível e o elemento é móvel no floema, os sintomas de deficiência ocorrem nas folhas mais velhas. Estes se manifestam como uma clorose internerval. Algumas variações ocorrem entre as espécies, citando-se como exemplo, o aparecimento da cor avermelhada nas folhas mais velhas do algodoeiro.

## ENXOFRE

Para as plantas, a fonte primária de enxofre são as rochas ígneas, nas quais o elemento ocorre, em geral, em pequenas proporções como sulfato.

No solo, a maior parte do enxofre encontra-se na forma orgânica e a fração mineral é, em geral, reduzida, de menos de 5% do total. Em condições aeróbicas, a forma que ocorre é o sulfato ( $SO_4^{2-}$ ); em anaeróbicas, de solos permanentemente encharcados, ocorrem sulfetos, podendo haver desprendimento de  $H_2S$  do solo ou até formação de S elementar.

Sulfatos de cálcio, magnésio, potássio e sódio podem ser importantes em solos das regiões áridas. Em solos ricos em argilas do tipo 1:1 e óxidos de ferro e alumínio é comum haver adsorção de sulfato. Em subsolos de áreas muito adubadas, podem haver acúmulo de quantidades consideráveis de sulfatos adsorvidos.

A atmosfera é outra fonte adicional de S que aparece na forma de  $\text{SO}_2$ , oriundo da queima de combustíveis fósseis, atividade vulcânica e de outros produtos orgânicos; o  $\text{H}_2\text{S}$  também é desprendido de pântanos e da matéria orgânica em decomposição.

Portanto, não se considerando os solos das regiões semi-áridas, a matéria orgânica é o principal reservatório de S no solo para as culturas. Para ser aproveitado pelas plantas, o S-orgânico deve ser mineralizado, o que depende da relação C/S: quando esta relação for menor que 200 o sulfato geralmente se acumula; acima de 400, o  $\text{SO}_4^{2-}$  produzido e mais o existente no solo são imobilizados. O S-orgânico nos solos brasileiros representa cerca de 60 – 90% do total.

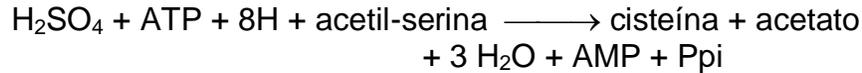
### Enxofre na Planta

O enxofre na planta encontra-se, na sua maior parte, nas proteínas. Os seus teores nas plantas são da ordem de 0,2 a 0,5% da matéria seca. As necessidades da maioria das culturas estão na faixa de 10 a 30 kg/ha de S, podendo ser mais elevadas para culturas exigentes. Entre as famílias de plantas, o requerimento de S aumenta na seguinte ordem: gramíneas < leguminosas < crucíferas e isto se reflete em correspondente diferença no conteúdo de S em suas sementes: 0,18 – 0,19; 0,25 – 0,30 e 1,1 – 1,7% na matéria seca, respectivamente. Respostas de culturas a enxofre têm sido freqüentes em experimentos realizados no Brasil e em outras regiões tropicais. O enxofre é aplicado indiretamente às culturas, como componentes de alguns adubos como o superfosfato simples, sulfato de amônio e sulfato de potássio e no gesso, que é um subproduto da fabricação do ácido fosfórico.

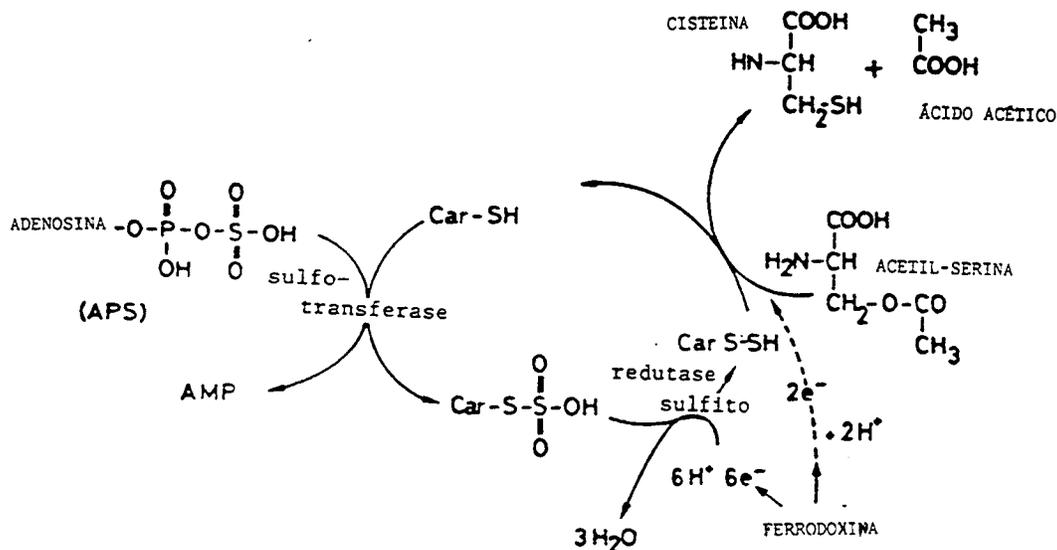
Absorção, transporte e redistribuição – a forma de S absorvida da solução do solo pelas raízes das plantas é a altamente oxidada, o sulfato –  $\text{SO}_4^{2+}$ . Estudos têm mostrado que o  $\text{SO}_2$  atmosférico pode ser absorvido através do estômatos das folhas e metabolizado, fazendo-o porém, de modo pouco eficiente. O S elementar usado como defensivo agrícola na forma de pó molhável aplicado às folhas, também pode ser absorvido pelas folhas e frutos e serem metabolizados. Altos níveis de alguns ânions como o cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e selenato ( $\text{SeO}_4^-$ ), reduzem a absorção do  $\text{SO}_4^{2+}$  por inibição competitiva. O sulfato é transportado das raízes para a parte aérea via xilema; o movimento do S no sentido contrário é muito pequeno, ou seja, o elemento é pouco redistribuído na planta. Por isso, sob condições de carência, a deficiência de enxofre ocorre nos órgãos mais novos, como as folhas mais novas.

Redução e assimilação – a principal forma de S absorvida pelas plantas, como visto, é a forma oxidada –  $\text{SO}_4^{2-}$ . Nos compostos orgânicos, a principal forma de S nas plantas, o enxofre aparece na forma reduzida correspondente ao sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ); portanto, para que ocorra a assimilação, o sulfato absorvido deve ser previamente reduzido, tal como ocorre com o nitrato. O processo de redução do sulfato não é ainda bem conhecido.

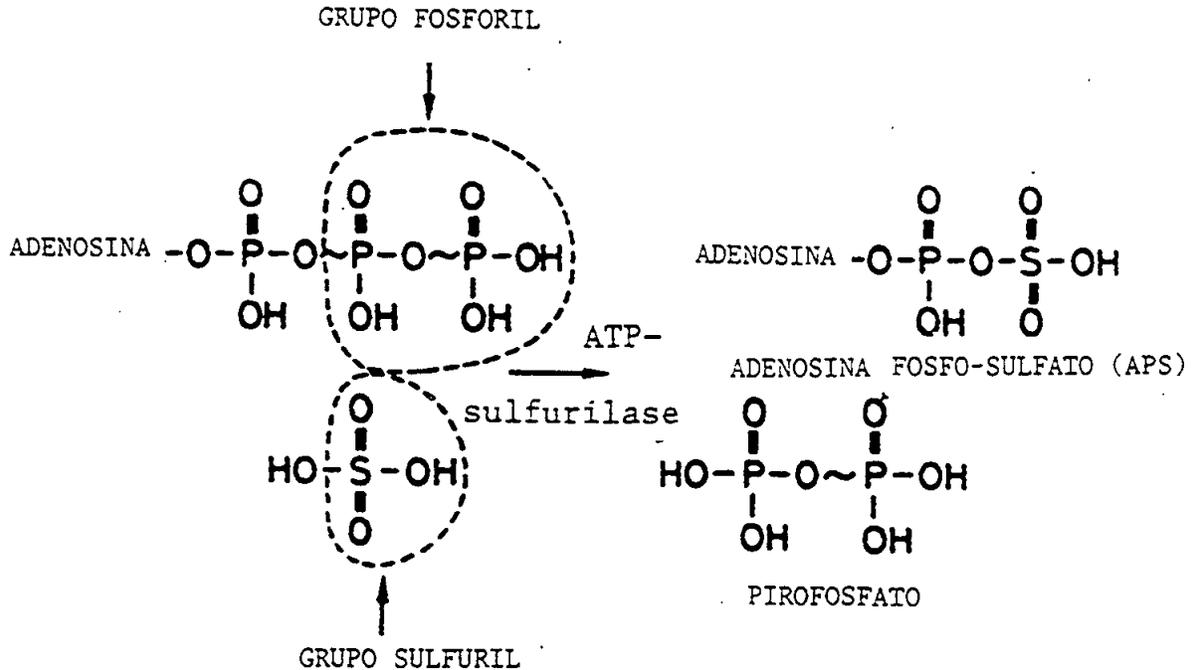
É geralmente aceito que em plantas superiores o primeiro passo para a redução assimilatória do sulfato é a ativação do  $\text{SO}_4^{2-}$  pelo ATP, com a formação da Adenosina-fosfo-sulfato (APS) e pirofosfato, mediante a ação da enzima ATP-sulfurilase encontrada nos cloroplastos, como mostra a Figura 3.11. Na reação seguinte, o grupo sulfuri do APS é transferido para um complexo carregador-SH – provavelmente um tripeptídeo, o glutathione, com um resíduo de cisteína servindo como grupo reativo – SH. Neste processo, catalisado pela APS – transferase (sulfo-transferase), o H do grupo sulfidrílo (-SH) do carregador é substituído pelo grupo sulfúril do APS (Figura 3.12). No passo seguinte o sulfito do Car-S-SO<sub>3</sub>H é reduzido a -SH (sulfidrílo) pela redutase do sulfito, cujo poder redutor provém da ferredoxina. Em seguida, o grupo SH do carregador é transferido para a acetil-serina, ocorrendo neste passo, a incorporação do enxofre a compostos orgânicos, com a formação da cisteína (aminoácido com S) e acetato, sendo também o carregador regenerado. Este último passo requer também 2 e<sup>-</sup>, os quais, provavelmente, originam da ferredoxina (Figura 3.12). O processo líquido da redução do sulfato pode ser descrito pela equação:



Portanto, a redução do  $\text{SO}_4^{2-}$  necessita de energia do ATP e de um poder redutor. O processo ocorre principalmente durante o período luminoso e as enzimas responsáveis estão localizadas nas membranas dos cloroplastos. Os plastídeos de células radiculares, provavelmente, são os responsáveis pela redução do sulfato em tecidos não clorofilados, embora a velocidade da redução é bem menor daquela observada nos cloroplastos. A cisteína é, portanto, o primeiro composto estável na redução assimilatória do  $\text{SO}_4^{2-}$  e é o precursor de outros compostos com enxofre, como a metionina, outra importante aminoácido com S, proteínas e coenzimas.



**FIGURA 3.11** Formação de adenosina fosfo-sulfato (APS) pela reação do ATP e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , mediada pela ATP-sulfurilase. (MENGEL & KIRKBY, 1987)



**FIGURA 3.12** Esquema simplificado mostrando a redução e assimilação do sulfato (MENGEL & KIRKBY, 1987).

Funções do enxofre – a cisteína e a metionina são os mais importantes aminoácidos contendo S e, portanto, o elemento está presente em todas as proteínas. Uma das principais funções do enxofre nas proteínas ou polipeptídeos é a formação da ligação dissulfeto (S-S). Estas ligações atuam na estabilidade da estrutura terciária das proteínas; a ligação dissulfeto tem um papel essencial, pois contribui para a conformação correta da proteína enzimática cataliticamente ativa. A ligação S-S é formada por grupos sulfidrilos (-SH) de resíduos de cisteína adjacente na cadeia protéica (-SH + HS -  $\longrightarrow$  -S-S-).

Um outro papel fundamental exercido pelo enxofre no metabolismo é a participação direta do grupo sulfidrilo (-SH), como o grupo ativo das enzimas na ligação com o substrato, embora nem todos os grupos SH livres sejam ativos. Muitas enzimas e coenzimas como a urease, APS – sulfotransferase e a coenzima A (CoASH), têm o grupo SH como grupo ativo nas reações enzimáticas. Na via glicolítica, por exemplo, a descarboxilação do piruvato com a formação do acetil – CoA é catalisada por um complexo multienzimático conhecido como complexo piruvato desidrogenase, que envolve três coenzimas contendo S: tiamina iro-fosfato (TPP), ácido lipóico e a CoASH e ainda, mais três cofatores –  $\text{NAD}^+$ ,  $\text{FAD}^+$  e  $\text{Mg}^{+2}$ :

O acetil-CoA é basicamente o centro de todo o metabolismo vegetal, sendo uma passagem obrigatória para uma série de processos importantes do metabolismo. Por exemplo, o grupo acetil (-CH<sub>2</sub> – CH<sub>3</sub>) do acetil-CoA pode entrar na via oxidativa do ciclo de Krebs ou na biossíntese de ácidos graxos, requer uma reação de carboxilação, a qual

é mediada por outra coenzima contendo enxofre – a biotina – e ativada por  $Mn^{2+}$ .

As ferredoxinas são proteínas de baixo peso molecular que contêm uma alta proporção de unidades de cisteína e apresentam enxofre em quantidades equivalentes ao Fe. Admite-se que as ligações entre os átomos de S-Fe na ferredoxina conferem ao composto uma configuração com um potencial redox altamente negativo (-0,43 V) e, assim, podem reduzir diferentes compostos em vários processos metabólicos importantes na planta, citando-se o  $NADP^+$ , nitrito (redutase do nitrito), sulfato (redutase do sulfato), redução do  $N_2$  (nitrogenase).

Alguns compostos voláteis contendo S contribuem para odores característicos que se desprendem de alguns produtos como a cebola, alho e mostarda.

O enxofre não reduzido (sulfato) é componente dos sulfolipídeos e assim um constituinte estrutural das membranas celulares. O sulfato é ligado aos lipídeos e são particularmente abundantes nas membranas dos tilacóides dos cloroplastos.

Devido a sua participação num número tão grande de compostos e reações, a carência de S provoca uma série muito grande de distúrbios metabólicos. Nestas condições, ocorre uma diminuição na síntese de proteínas e açúcares, um acúmulo de N-orgânico solúvel e  $N-NO_3^-$  e, com isto, uma redução no crescimento da planta (Tabela 3.11.). A fixação biológica do  $N_2$  atmosférico também é bastante diminuída sob condições de deficiência de S; a síntese de gorduras (óleos) também é afetada nestas condições.

**TABELA 3.11 Efeito do nível de enxofre no meio sobre alguns componentes da folha de algodoeiro**

Nível $SO_4^{2-}$ (ppm)	Peso Fresco (g)	S- $SO_4^{2-}$ (%)	S- Orgânico (%)	Açúcar Total (%)	N- $NO_3^-$ (%)	N-org. Solúvel (%)	N-prot. (%)
0,1	13	0,003	0,11	0,0	1,39	2,23	0,96
1,0	50	0,003	0,11	0,0	1,37	2,21	1,28
10	237	0,009	0,17	1,5	0,06	1,19	2,56
50	350	0,10	0,26	3,1	0,00	0,51	3,25
200	345	0,36	3,25	3,4	0,10	0,45	3,20

Fonte: Ergie & Eaton, 1951, em MENGEL & KIRKBY (1987).

Sintomas de deficiência – como o enxofre é pouco redistribuído nos tecidos vegetais, em caso de carência do elemento, os sintomas aparecem primeiro nas folhas mais novas, como uma clorose generalizada no limbo foliar.

## Funções dos Micronutrientes

### **BORO**

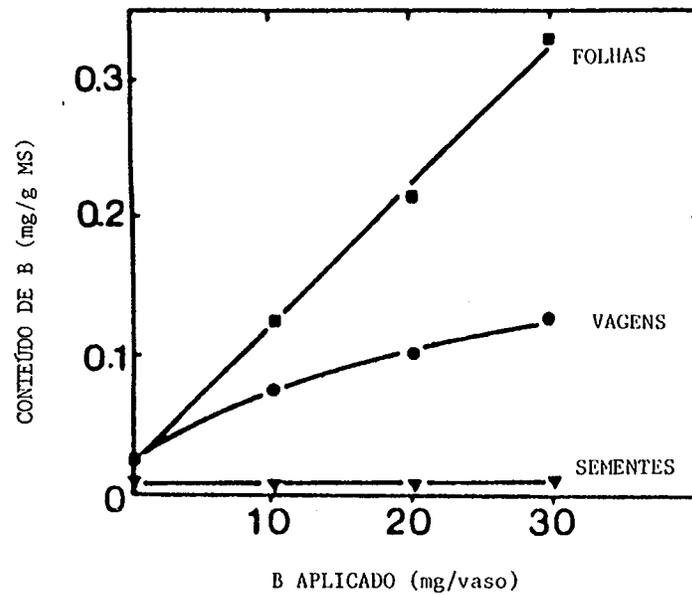
O conteúdo de B total nos solos é bastante variado, citando-se valores de 20 a 200 ppm; pequena fração deste está na forma disponível às plantas, variando de 0,4 a 5 ppm. Em solos das regiões úmidas, a turmalina constitui o principal mineral primário contendo o B, mas de pouca importância no fornecimento do elemento às plantas, devido a sua alta resistência ao intemperismo. A matéria orgânica é a principal fonte de B destes solos às plantas. Portanto, solos com baixos teores de matéria orgânica e a ocorrência de fatores que diminuem a sua mineralização, predispõem as culturas à carência do micronutriente.

### **Boro na planta**

O B é o único nutriente que não atende ao critério direto de essencialidade, mas satisfaz o critério indireto. A maior prova da sua essencialidade consiste em que, nos solos das regiões tropicais, ao lado do Zn, é o micronutriente que mais frequentemente promove deficiência nas culturas.

A concentração de B nos tecidos das monocotiledôneas, geralmente, varia de 6 a 18 ppm e nas dicotiledôneas, de 20 a 60 ppm; por isso, a deficiência de boro em cereais é menos comum no campo.

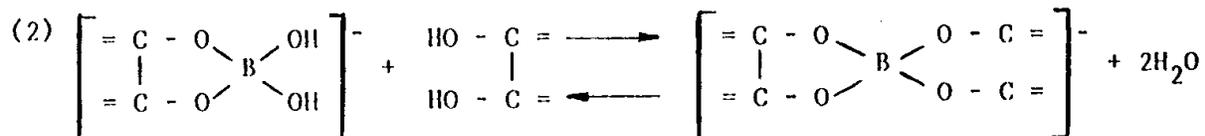
Absorção, transporte e redistribuição – o Boro é, provavelmente, absorvido pelas raízes das plantas na forma de ácido bórico não dissociado ( $H_3BO_3$ ), a principal forma solúvel no solo. Há ainda muitas controvérsias se o boro é absorvido por processo passivo ou ativo. Tal como ocorre com o cálcio, o boro sofre um transporte unidirecional no xilema, via corrente transpiratória, das raízes para a parte aérea; no floema, o B é praticamente imóvel. Assim, o boro não é redistribuído nas plantas, o que provoca o aparecimento dos sintomas de carência primeiramente nos órgãos mais novos e nas regiões de crescimento. Outras consequências da imobilidade do boro são: que a planta necessita de um suprimento constante pelo meio; para a prevenção ou correção de carência o elemento deve ser fornecido preferencialmente via radicular e que o conteúdo do elemento segue a taxa de transpiração dos órgãos de partes aérea (folhas > vagens > sementes), como mostra a Figura 3.13.



**FIGURA 3.13** Efeito de doses de B aplicado ao solo sobre sua distribuição na parte aérea da colza (*Brassica napus* L. ssp oleifera)

Gerath et al., 1975, em MARCHNER, 1986).

*Funções do Boro* – como o B não atende ao critério direto de essencialidade, os seus papéis na planta ainda não foram demonstrados de maneira inequívoca. Muitas das funções postuladas ao boro estão relacionadas à grande afinidade que o íon borato apresenta para com os compostos polihidroxil, que apresentam um par de grupos cis-hidroxil (cis-diol), incluindo açúcares e alcoóis açúcares, que servem, por exemplo, como constituintes da hemicelulose da parede celular. O ácido bórico forma ligações mono (1) e diester (2) com os grupos cis-diol:



Uma importante função atribuída ao boro é a de facilitar o transporte de açúcares através das membranas. Neste caso, o borato formaria complexos açúcar-borato que atravessariam mais facilmente as membranas celulares do que as moléculas de açúcares altamente polares. Hoje, aceita-se também que o boro esteja envolvido na síntese da base nitrogenada Uracila. Esta base é precursora da Uridina Difosfato Glicose (UDPG), a

qual é uma coenzima essencial na síntese da sacarose, que é a forma mais importante de açúcar transportada na planta. Assim, o menor transporte de açúcar em plantas deficientes em boro seria consequência destes dois fatores.

Como a Uracila é uma base nitrogenada componente do RNA, a deficiência de B também afeta a síntese do ácido nucleico e, em consequência, a síntese de proteínas. Também tem sido demonstrado que o B é necessário para a incorporação do fosfato em nucleosídeos para a formação de nucleotídeos (nucleosídeo + Pi  $\longrightarrow$  nucleotídeo), que são as unidades formadoras dos ácidos nucleicos (Tabela 3.12). Nas plantas deficientes em B ocorre menor síntese de DNA e RNA, levando, em consequência, à menor produção de proteínas pelas plantas.

**TABELA 3.12 Influência do B no DNA e RNA e na síntese de proteína em girassol, sob moderada deficiência de boro**

B na solução (ppm)	Folhas	Raízes
P no DNA, em % do P – total		
0	0,2	0,5
1	1,4	1,8
P no RNA, em % do P – total		
0	1,4	3,6
1	6,4	13,0
N – protéico, mg/vaso		
0	627	713
1	1.267	1.468

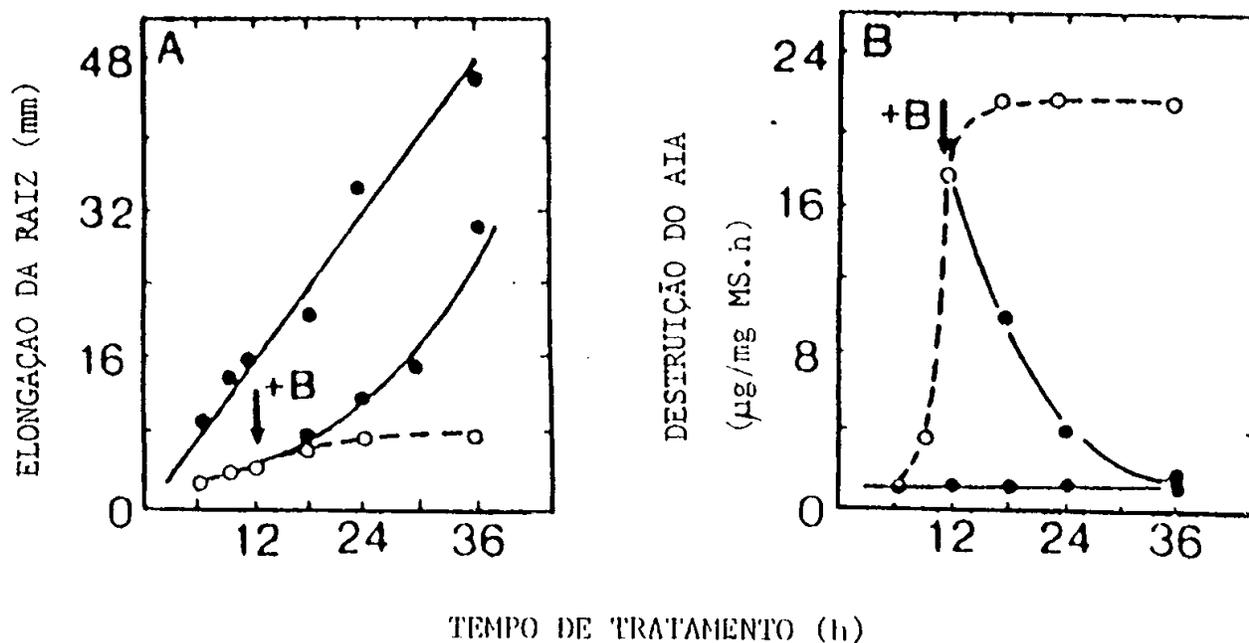
Fonte: Hundt et al. (1970) em MENGEL & KIRKBY (1987).

Uma substancial proporção do B-total das plantas é encontrada em complexos de esteres cis-borato nas paredes celulares. O maior requerimento de B pelas dicotiledôneas em relação às monocotiledôneas é, provavelmente, relacionado à maior proporção de compostos com a configuração cis-diol nas paredes celulares, principalmente hemicelulose e precursores da lignina. Tem sido mostrado que o conteúdo de B fortemente complexado nas paredes celulares de monocotiledôneas (p. ex.: trigo) varia de 3 a 5  $\mu$  g/g de matéria seca e de certas dicotiledôneas (p. ex.: girassol) é superior a 30  $\mu$  g/g de matéria seca. Estas diferenças refletem as diferentes exigências em boro entre as espécies. Admite-se que as funções do B no apoplasto são relativamente similares às do cálcio, ambos regulando a síntese e a estabilidade de constituintes da parede celular, incluindo as membranas plasmáticas. Neste último caso, o efeito seria, provavelmente, pela formação de complexos cis-diol-borato com constituintes das membranas.

Mais rápido efeito da deficiência de boro em plantas é a paralisação do crescimento dos meristemas apicais, tanto das raízes quanto da parte aérea. A Figura 3.14 A mostra que a alongação das células das raízes é drasticamente afetada após 6 horas da omissão de boro do meio e, com a restauração no seu suprimento, o processo volta rapidamente ao normal. A Figura 3.14 B mostra que há uma grande similaridade entre a atividade da oxidase do AIA – que controla o nível de AIA no tecido – quando comparada com a alongação radicular (Figura 3.14 A), influenciadas pela deficiência de boro. Portanto, admite-se que a paralisação do crescimento dos meristemas em plantas deficientes em boro é resultado de ambos, menor alongação e acumulação de níveis tóxicos de AIA. Como visto anteriormente, o B está envolvido na síntese de ácidos nucleicos e conseqüentemente, na síntese de proteínas; portanto, a divisão celular é também um outro fator que afeta o crescimento dos meristemas em plantas deficientes em B.

A exigência em boro é normalmente maior para a redução de sementes e grãos do que para o crescimento vegetativo das plantas. Isto é devido à sua participação no processo de fertilização; o B está envolvido na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico, cuja carência leva à má formação de grãos em cereais (p. ex.: milho, esterilidade masculina em trigo), má formação dos cachos de uva, etc.

Postula-se também que o B, formando complexos com compostos orgânicos, regula a atividade enzimática e o fluxo de substrato em certas vias metabólicas. Um exemplo importante é a formação de um complexo entre o borato e o 6-P-gliconato, o primeiro composto formado na via das pentoses-fosfato, uma via alternativa da glicólise na degradação de carboidratos. O complexo 6-P-gliconato-borato regularia a atividade da enzima 6-P-gliconato desidrogenase e, conseqüentemente, a via das pentoses-fosfato, favorecendo, assim, a via glicolítica. Em plantas deficientes em B, ocorrendo a exaltação da via das pentoses-fosfato, há um acúmulo dos produtos gerados, dentre eles os fenóis que são fitotóxicos em níveis elevados. Tem sido proposto que a causa primária das necroses observadas nos tecidos de plantas deficientes em B estão associadas com o acúmulo de fenóis e de auxinas.



**FIGURA 3.14** Efeito da deficiência de boro sobre a elongação da raiz (A) e da atividade da oxidase do AIA (B) em *Cucurbita pepo* L.: + B (- • -) - B (- o -) (Bohnsack & Albert, 1977, em MARSCHNER, 1986)

Sintomas de deficiência e toxidez de boro – dado a imobilidade do B na planta, os sintomas de deficiência aparecem primeiramente nos órgãos mais novos e nos meristemas apicais, tanto da parte aérea quanto das raízes. Caracteriza-se pela redução do tamanho e deformação das folhas mais novas, morte da gema terminal, menor crescimento das raízes. Há muito se sabe existir um limite estreito entre o teor adequado e o nível tóxico de B na planta; portanto, a adubação com o elemento deve ser cuidadosa, principalmente nos solos arenosos, que devem receber doses menores e mais freqüentes, comparativamente aos argilosos. Os sintomas de toxidez manifestam-se como uma clorose malhada e depois manchas necróticas nos bordos das folhas mais velhas, que coincidem com as regiões da folha onde há maior transpiração.

## CLORO

Não se encontra relatos na literatura sobre a deficiência de cloro em plantas sob condições de campo. É muito mais freqüente citações de toxicidade do elemento do que de deficiência e é difícil sintomas de carência do mesmo em condições normais de experimentação.

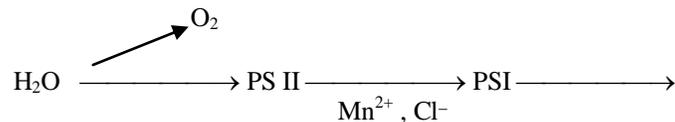
### Cloro na planta

A essencialidade do cloro foi demonstrada em tomateiro cultivado em solução nutritiva purificada só recentemente (BROYER et al. 1954). A exigência de cloro é maior que a de qualquer outro micronutriente. Em plantas que recebem doses médias de KCl como fonte de potássio, encontram-se milhares de ppm de cloro, o que não deve refletir,

entretanto, necessidade nutricional. Normalmente encontram-se teores de cloro nos tecidos das plantas entre 2.000 a 20.000 ppm, níveis típicos dos macronutrientes. Por outro lado, o requerimento para o ótimo crescimento está entre 340 a 1.200 ppm, níveis compatíveis com os micronutrientes. Considerando em média 1.000 ppm de Cl na matéria seca das plantas como nível ótimo, o requerimento médio das culturas seria de 8 a 10 kg do elemento por hectare, demanda esta suprida pela atmosfera e pela água da chuva.

Absorção, transporte e redistribuição – o cloro é obtido pelas plantas de diferentes fontes: reservas do solo, água da chuva, fertilizantes e poluição aérea. Pelas raízes, o cloro é absorvido da solução do solo como  $\text{Cl}^-$ ; efeito competitivo com  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  tem sido relatado. O cloro pode também ser absorvido pela parte aérea, diretamente da atmosfera; a quantidade de  $\text{Cl}^-$  na atmosfera e na água de chuva depende da distância do mar. A redistribuição do elemento depende da distância do mar. A redistribuição do elemento depende da espécie considerada; algumas mostram os sintomas de deficiência nas folhas mais velhas e outras nas folhas mais novas.

Funções do cloro – MARSCHNER (1986) relata que Warburg, em 1944, descobriu que a reação de Hill (fase clara da fotossíntese) em cloroplastos isolados necessitava de cloreto. Desde então o envolvimento do cloro na quebra fotoquímica da água no fotossistema II tem sido confirmado por vários autores. Admite-se que o cloro atua como um cotator junto ao manganês no sistema de evolução do  $\text{O}_2$ :



Como a fotofosforilação – produção de ATP na fotossíntese – depende do fluxo de elétrons, este processo também é influenciado pelo cloro, como mostra a Tabela 3.13. Embora o bromo mostre o mesmo efeito do cloro, o mesmo não é tão abundante para atender as exigências das plantas. A concentração de cloro nos cloroplastos de espinafre e beterraba açucareira tem sido determinada em torno de 100 mM, bem maior que os 10 mM encontrado nos tecidos das folhas, implicando em uma acumulação preferencial do elemento nos cloroplastos.

Evidências mais recentes indicam que a ATPase localizada na membrana do tonoplasto é estimulada especificamente pelo  $\text{Cl}^-$ . Portanto, o efeito do KCl sobre a atividade de ATPase nas raízes pode ser resultado de duas reações separadas: na primeira o  $\text{K}^+$  estimula a ATPase ligada à plasmalema e na segunda o  $\text{Cl}^-$  ativa a ATPase ligada ao tonoplasto.

Pouco se sabe sobre a função do cloro em outros processos metabólicos. Tem sido também atribuído ao cloro uma importante função, atuando na regulação osmótica, o que afetaria indiretamente a fotossíntese e o crescimento da planta, via controle da abertura e fechamento estomatal.

**TABELA 3.13 Efeito do cloro e outros ânions sobre a fotólise da água (evolução de O<sub>2</sub>) e formação de ATP por cloroplastos isolados de espinafre**

Ânions (± 4 mM)	O <sub>2</sub> evoluído (μ mol)	ATP formado (μ M)
Ausente	0	0,3
Cl <sup>-</sup>	4,0	3,7
Br <sup>-</sup>	4,0	4,0
I <sup>-</sup>	0	0,7

Fonte: Bové et al. (1963), em MARSCHNER (1986).

Sintomas de deficiência e toxidez de cloro – os sintomas de deficiência de cloro têm sido descritos como murchamento, clorose, bronzeamento e deformação das folhas que tomam aspecto de taça (MALAVOLTA, 1980). As raízes de plantas deficientes também crescem menos. Sintomas de toxidez de cloro têm sido relatados, como queima das pontas e margens das folhas, bronzeamento, amarelecimento precoce e abscisão das folhas. MENGEL & KIRKBY (1987) citam que a beterraba, cevada, milho, espinafre e tomate são altamente tolerantes, enquanto que o fumo, feijões, citrus, batata, alface e algumas leguminosas são muito propensas à toxicidade. Citam ainda que a redução do crescimento e qualidade das culturas estão associados a 0,5 – 2% de Cl para as sensíveis e 4% ou mais na matéria seca das espécies tolerantes.

## COBRE

A forma iônica mais comum do cobre em solos é Cu<sup>2+</sup>. O elemento é adsorvido à fração mineral de solos e complexado pela matéria orgânica. A complexação de cobre pela matéria orgânica é a reação mais importante a determinar o comportamento do elemento na maioria dos solos e apresenta um efeito direto na sua disponibilidade às plantas. Mais de 98% do cobre da solução do solo está complexado como quelato, com compostos orgânicos de baixo peso molecular como aminoácidos, compostos fenólicos e outros compostos quelantes.

### Cobre na planta

A concentração ótima de cobre na maioria das plantas, geralmente, está entre 5-20 ppm na matéria seca. Deficiências são prováveis quando seu teor na matéria seca encontra-se em níveis inferiores a 4 ppm.

Absorção, transporte e redistribuição – o cobre é absorvido da solução do solo como Cu<sup>2+</sup>; existem controvérsias se o mesmo também é absorvido na forma de quelado. No xilema, o cobre é transportado na forma de quelado com aminoácidos. Considera-se o cobre como um elemento imóvel no floema, portanto, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas mais novas. Mas, a redistribuição é dependente do nível de cobre no tecido: não se dá quando há deficiência, podendo ocorrer quando o teor é elevado – o Cu pode sair da folha e dirigir-se para os frutos.

Funções do cobre – a principal função do cobre no metabolismo vegetal é como ativador ou componente de enzimas que participam de reações de oxi-redução. A Tabela 3.14 enumera as principais enzimas, encontradas em plantas superiores, que contêm cobre. Estas enzimas contendo cobre atuam no transporte eletrônico com mudança de valência – plastocianina, lacase, oxidase do ácido ascórbico e complexo da oxidase do citocromo, e no transporte eletrônico sem mudança de valência – oxidase da amina, tirosinase, oxidase da galactose.

Assim, o cobre participa de uma série de processos metabólicos nos vegetais. Em plantas deficientes em cobre, a taxa fotossintética é reduzida por uma série de razões. Mais de 50% do cobre localizado nos cloroplastos estão ligados à plastocianina, que é um componente da cadeia de transporte de elétrons do Fotossistema I, o qual tem sua atividade drasticamente afetada em plantas deficientes no elemento (Tabela 3.15.). O cobre é componente de outras enzimas nos cloroplastos. É requerido para a síntese da plastoquinona e ativador da enzima RuBP-carboxilase.

---

TABELA 3.14 Enzimas dependentes de cobre

Nome Comum	Reação	Peso Molecular	Fonte
Polifenol oxidase Catecolase	$RH_2 + 0,5O_2 \rightarrow R + H_2$	100.000 4 Cu / mol	Batata, banana, Fumo, chá, café
Cresolase, Tirosinase	$AH_2 + 0,5O_2 \rightarrow A + H_2O$	119.000 4 Cu / mol	Batata, cogumelo
Lacase	$BH_2 + 0,5O_2 \rightarrow B + H_2O$	110.000 4 Cu / ol	<u>Rhus succedanea</u> <u>Polyporus</u>
Oxidase do ácido Ascórbico	Ácido ascórbico $\rightarrow$ Dicetoglicônico	146.000 8 Cu / mol	Cucurbitácea Outras plantas
Diamino oxidase	Putrescina $\rightarrow$ Aminoaldeído + $H_2$	73.000 1 Cu / mol	Leguminosas, Outras plantas
Plastoclanina	Doação de $e^-$ para clorofila Clorofila	11.000 20.000 1-2 Cu / mol	Todas as plantas Superiores e outras Fotossintéticas
Umeclanina	Oxidase por $O_2$ na Presença da lacase	14.600 1 Cu / mol	Nabo
Estelacianina	Semelhante à facaso	27.000	<u>Rhus vernícefera</u>
Carboxilase de Ribulose difosfato	Rubulose de P + $CO_2 \rightarrow$ 2 ácido P glicérico	560.000 1 Cu / mol (Mg também)	Espinafre
Oxidase do Citocromo	Transporte de $e^-$ na Respiração	-	Geral
Dismutase de Superóxido	$O_2^- + O_2^- + 2H^+ \rightarrow$ $O_2 + H_2O$	32.000 1 Cu / mol (Zn também)	Espinafre Trigo

Fonte: HEWITT & SMITH (1975).

**TABELA 3.15 Efeito do cobre sobre o conteúdo de pigmentos e transporte fotossintético de elétrons no FSI e II, em cloroplasto de espinafre**

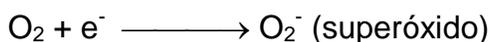
Tratamento	Pigmento ( $\mu$ g / g folha fresca)			Plastoclamina	Atividade	
	Clorofil a	Carotenóides	Plastoquinona	(n átomos/mg clorofila)	FS II	FS I
+ Cu	1.310	248	106	5,16	100	100
- Cu	980	156	57	2,08	66	22

Fonte: Bbaszynski et al. (1979), em MARSCHNER (1986).

A citocromo oxiasse, que contém cobre e ferro, atua no transporte terminal de elétrons na cadeia respiratória no mitocôndria, afetando diretamente a fosforilação oxidativa.

A fixação biológica do nitrogênio é também afetada pelo cobre nos nódulos radiculares para o mecanismo de fixação, um efeito indireto, envolvendo a falta de suprimento de carboidratos para a nodulação e fixação do  $N_2$  em plantas deficientes, é mais provável. Cita-se ainda a necessidade do cobre para a síntese de leghemoglobina e menor atividade da oxidase do citocromo no processo respiratório do bacteróide.

O cobre e o Zn participam do grupo prostético da dismutase de superóxido (Cu-Zn-SOD), enzima que ocorre em todos os organismos aeróbicos. Esta enzima protege o organismo dos efeitos deletérios causados pelos radicais superóxidos ( $O_2^-$ ), os quais podem ser formado quando um único elétron é transferido para o  $O_2$ :



O peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) é quebrado pela catalase, que contém Fe. Uma alta proporção de SOD é encontrada nas folhas, mais significativamente nos cloroplastos – mais de 90% - indicando um papel protetor do processo fotossintético.

Sintomas de deficiência e toxidez de cobre – as plantas deficientes em cobre mostram as folhas novas inicialmente verde escuras e com aspecto flácido, com tamanho desproporcionalmente grande. As folhas encurvam-se para baixo e as nervuras podem ficar salientes (cafeeiro). Em cereais as folhas tornam-se mais estreitas e retorcidas, com as pontas brancas. O perfilhamento é reduzido e observa-se também a esterilidade masculina. Este sintoma está relacionado com o papel do cobre na viabilidade do grão de pólen. Parece que a esterilidade masculina em cereais é resultado do acúmulo excessivo de auxina. A toxidez de cobre manifesta-se em menor crescimento e funcionamento anormal das raízes, indicando danos na deficiência de ferro induzida, aparecimento de manchas aquosas e amareladas ao longo da nervura principal, que se tornam necróticas.

Dada a grande afinidade do cobre por compostos orgânicos é possível que os sintomas foliares sejam provocados pelo deslocamento do ferro de compostos, efetuado pelo cobre.

## FERRO

O ferro é o elemento metálico mais comum na crosta terrestre. Em solos, a ocorrência é principalmente na forma de óxidos e hidróxidos. Os teores totais em solo estão comumente entre 0,5 a 5%, mas em alguns solos brasileiros, os teores podem ultrapassar 10%. A solubilidade e geoquímica do ferro são afetadas pelo estado de oxidação e pelo pH do solo. A geoquímica do ferro é complexa e determinada pela facilidade de mudança da valências ( $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ ), em resposta à alterações das condições físico-químicas do meio. A disponibilidade do ferro é maior sob condições de pH mais baixo (ácido) e com a diminuição do potencial de oxidação-redução (Eh) do solo. Na solução do solo em solos aerados a concentração das formas iônicas  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  são extremamente baixas ( $10^{-10}$  M ou menos). Quelados de  $\text{Fe}^{3+}$ , e ocasionalmente de  $\text{Fe}^{2+}$ , são as formas predominantes na solução do solo.

### Ferro na planta

A concentração de ferro nos tecidos vegetais considerada adequada, varia normalmente entre 50 e 250 ppm na matéria seca. Geralmente, teores menores de 50 ppm indicam problemas de deficiência do elemento.

Absorção, transporte e redistribuição – o ferro pode chegar às raízes das plantas como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e como quelado. O íon requerido no metabolismo é o  $\text{Fe}^{2+}$  e esta forma é absorvida pelas plantas. Ao que parece, a eficiência de absorção está relacionada com a capacidade das raízes em efetuar a redução do ferro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) para ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) na rizosfera. Algumas plantas eficientes em absorver ferro baixam o pH da solução e excretam substâncias redutoras capazes de reduzir o  $\text{Fe}^{3+}$  para  $\text{Fe}^{2+}$ . Concentrações elevadas de outros cátions na solução diminuem a absorção de ferro. O aumento da disponibilidade do Mn em solos ácidos, por exemplo, inibe competitivamente a absorção de Fe causando o aparecimento de sintomas de deficiência. O transporte do Fe se dá pelo xilema, via corrente transpiratória, predominante na forma de quelado do ácido cítrico. O Fe é pouco redistribuído na planta, portanto, os sintomas de carência manifestam-se inicialmente nas folhas mais novas. Pode-se encontrar teor de Fe<sup>-</sup> total alto em folhas deficientes do elemento. Dados deste tipo sugerem que parte do nutriente esteja em forma inativa, como  $\text{Fe}^{3+}$  ou precipitado pelo fósforo. A fitoferritina  $(\text{FeO.OH})_8 \cdot (\text{FeO.OPO}_3\text{H}_2)$  é uma forma de reserva de Fe no estroma de plastídeos nas células das plantas.

Funções do Ferro – o Fe é componente de uma série de enzimas, a maioria das quais participam de reações de oxidação-redução no metabolismo, em que há mudança reversível de valência ( $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$ ). Dois grupos de proteínas contendo o Fe são bem definidos: hemo-proteína e Fe-S-proteína. Na Tabela 3.16 está apresentada uma lista de proteínas dependentes de ferro.

---

TABELA 3.16 Principais proteínas dependentes do ferro

Nome	Reação	Fonte
<b>I. Proteínas com heme</b>		
Catalase	$2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ também como peroxidase (oxidação do etanol)	Geral em plantas superiores, leveduras e fungos
Peroxidase	$\text{AH}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{A} + 2\text{H}_2\text{O}$	Idem
Citocromos a, a <sub>3</sub> , b <sub>2</sub> , b <sub>3</sub> , b <sub>6</sub> , f	Transporte de e <sup>-</sup> na Fotossíntese, respiração Fixação do N <sub>2</sub> .	Plantas superiores, leveduras, fungos, algas, bactérias
Hemoglobina (LegHb)	$\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	Nóbulos das leguminosas
Redutases de sulfito	sulfito $\rightarrow$ sulfeto (?)	espinafre
Redutases da hidroxilamina	$\text{NH}_2\text{OH} + 2\text{H} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Idem
<b>II. Proteína tipo ferredoxina</b>		
Ferredoxina	Transporte eletrônico na fotossíntese e na fixação do N <sub>2</sub>	Plantas superiores em Geral, leguminosas, algas
Desidrogenases succínicas	Succiato $\rightarrow$ fumanato + 2H	Mitocôndrios, leveduras
Nitrogenase	$2\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$	<u>Clostridium</u> , <u>Rhizobium</u> , <u>Azotobacter</u>
<b>III. Proteínas não heme e diversas com ou sem enxofre labil</b>		
Redutase de Nitrito	$\text{HNO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$	Plantas em geral, algas
Hydrogenase	$\text{H}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (comum) $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ ( <u>Clostridium</u> )	<u>Azotobacter</u> , <u>Clostridium</u> Cloroplastos
Aconitase	Citrato Isocitrato	Geral nas plantas Superiores; leveduras, fungos e bactérias.

Fonte: HEWITT & SMITH (1975).

As hemo-proteínas são enzimas que apresentam o grupo heme (complexo Fe-porfirina) como um grupo prostético. Neste grupo incluem-se as enzimas catalase,

peroxidase, citocromo oxidase, bem como outros citocromos. Os citocromos são constituintes do sistema redox em cloroplastos transporte terminal de elétrons na cadeia respiratória. O papel da leghemoglobina no processo de fixação biológica do  $N_2$  atmosférico também já foi discutido (ver Figura 3.3.). A catalase e a peroxidase são outras enzimas com heme e sob condições de deficiência de Fe apresentam grande redução nas suas atividades (Tabela 3.17). A catalase atua na dismutação de  $H_2O_2$  para água e  $O_2$ , cuja reação pode ser observada na Tabela 3.16 ou no item referente às funções do cobre, (ver pag. 153), e tem papel importante nos cloroplastos, fotorrespiração e glicólise, onde  $H_2O_2$  é produzido. O  $H_2O_2$  é um oxidante energético e em concentrações elevadas apresenta um efeito deletério aos tecidos vegetais. As peroxidases, que são abundantes em plantas, catalisam reações de redução de peróxidos orgânicos – reação na Tabela 3.16 – e também de reações como em seguida:

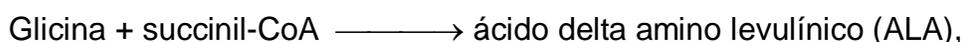


Nesta reação, as peroxidases ligadas às paredes celulares catalisam a polimerização de fenóis com a produção da lignina. As peroxidases são abundantes nas paredes celulares da endoderme das raízes.

O outro grupo de proteínas, Fe-S-proteína, também participam de importantes reações de oxi-redução no metabolismo das plantas. O exemplo mais importante deste grupo é a Ferredoxina, a qual participa como um transferidor de elétrons em um grande número de processos metabólicos importantes, citando-se a fotossíntese, redução do nitrito (Figura 3.5), fixação biológica do  $N_2$  (Figura 3.3) e redução do sulfato (Figura 3.12).

O Fe também é componente de dois complexos enzimáticos ligados ao metabolismo do Nitrogênio, a Nitrogenase - responsável pela fixação biológica do  $N_2$  – e a Redutase do Nitrato – responsável pela redução do  $NO_3^- \longrightarrow NO_2^-$ , no processo da redução assimilatória do Nitrato, fatos também já discutidos (ver 3.2.1).

Outras funções também são atribuídas ao Fe. A síntese protéica é diminuída em plantas deficientes em Fe, reflexo da diminuição do número de ribossomos – organelas de síntese protéica – e no teor de RNA. O Fe também está envolvido na síntese da clorofila (Tabela 3.17). Cerca de 80% do Fe nas folhas verdes estão localizados nos cloroplastos. Quando há deficiência desse micronutriente cai o teor de clorofila, o número de cloroplastos diminui e há menor quantidade de grana nos mesmos. A Figura 3.15 mostra de modo esquemático a biossíntese da clorofila e de outros compostos contendo o grupo heme. Em plantas deficientes em Fe há um decréscimo na produção do ALA:



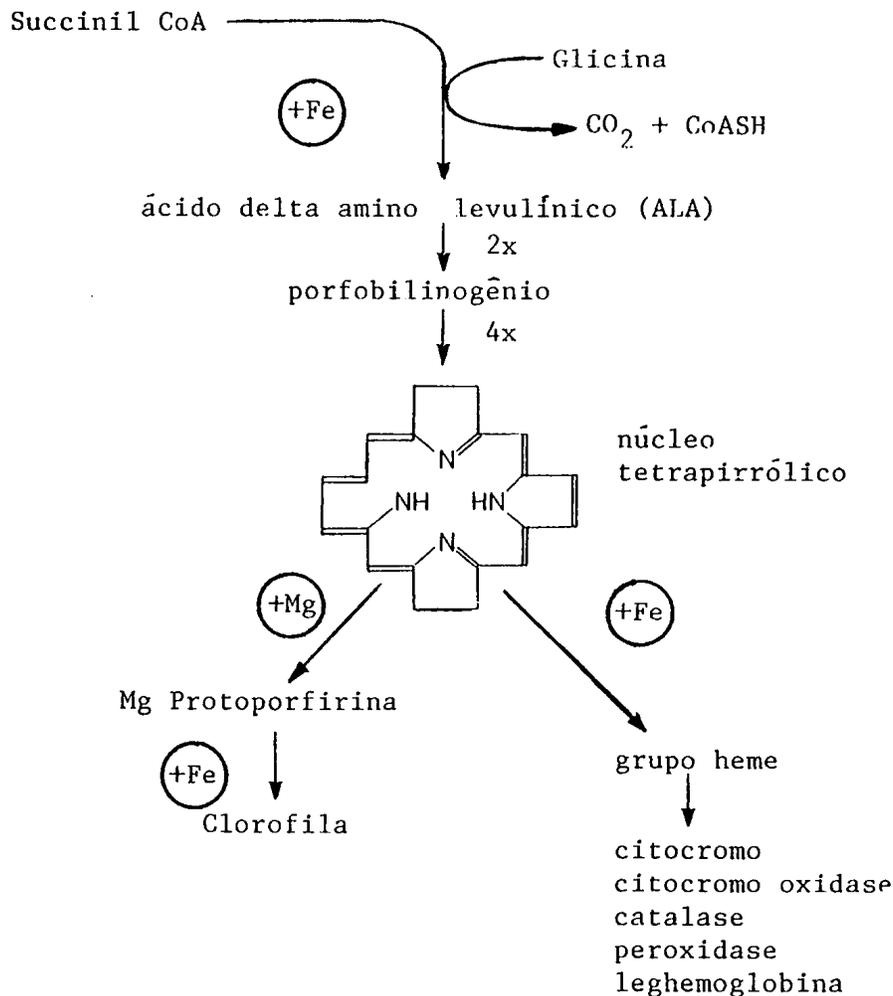
O ALA é precursor das porfirinas, componentes da clorofila.

A incorporação do Fe ou Mg como um átomo central no núcleo tetrapirrônico, leva à formação do grupo heme e às enzimas que o contém e à clorofila, respectivamente.

**TABELA 3.17 Efeito do suprimento de Fe sobre o teor de Fe, de clorofila e atividade enzimática em folhas de tomate**

Tratamento	Teor Fe (ppm - M. fresca)	Clorofila (mg / g M. fresca)	Ativ. Enzimática Rel.	
			Catalase	Peroxidade
Fe – adequado	18,5	3,52	100	100
Fe – deficiente	11,1	0,25	20	56

Fonte: Machold (1968), em MENGEL & KIRKBY (1987).



**FIGURA 3.15 Participação do Fe na biossíntese da clorofila e enzimas contendo o grupo heme**  
(MENGEL & KIRKBY, 1987).

Sintomas de deficiência de ferro – o Fe é pouco móvel na planta, portanto, os sintomas aparecem primeiro nas folhas mais novas, as quais amarelecem devido à menor síntese de clorofila, enquanto apenas as nervuras podem ficar verdes durante algum tempo, destacando-se como um reticulado fino (rede verde fina nas nervuras sobre fundo amarelo). Com a evolução, as folhas podem sofrer um branqueamento.

## MANGANÊS

O Mn é o micronutriente mais abundante no solo depois do ferro. No solo, o Mn ocorre em três valências,  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$  ( $Mn_2O_3 \cdot n H_2O$ ) e  $Mn^{4+}$  ( $MnO_2 \cdot nH_2O$ ). Estas formas estão em equilíbrio por reações de oxidação-redução. A principal forma de Mn para a nutrição das plantas é o  $Mn^{2+}$ , que pode encontrar-se adsorvido aos colóides, solúvel na solução do solo na forma iônica (pequena concentração) ou na forma de quelado. Análises da solução do solo têm demonstrado que mais de 90% do Mn está complexado a compostos orgânicos. Nos solos brasileiros, o Mn aparece variando de 0 a 4.000 ppm em teores totais e de 0,1 a 100 ppm em teores solúveis. A faixa de variação no solo é muito grande, por causa da ocorrência também variável no material de origem. Dois fatores principais afetam a disponibilidade Mn no solo: o pH e o potencial redox. Sob condições de solo ácido, a disponibilidade é alta devido à maior solubilidade dos compostos que o contém. A diminuição do potencial de oxi-redução do solo, pela inundação por exemplo, favorece a solubilização dos óxidos de manganês e maiores teores de  $Mn^{2+}$  são observados, o que pode alcançar níveis tóxicos para as culturas.

### Manganês na planta

Devido a predominância da acidez nos solos das regiões tropicais e subtropicais, o que favorece a disponibilidade do Mn, é muito mais freqüente a toxidez do que a deficiência do micronutriente nas plantas.

O nível crítico do Mn para a maioria das culturas varia de 10 a 20 ppm na matéria seca das folhas maduras. Diferentemente do nível crítico, o nível tóxico apresenta grande variação entre as espécies, cultivares e condições ambientais. Os teores tóxicos associados com uma redução de 10% na produção de matéria seca variam, dependendo da espécie, de 100 a 7.000 ppm (FAQUIN & VALE, 1991). As leguminosas parecem ser mais sensíveis devido, possivelmente ao efeito negativo da toxicidade sobre o processo de fixação biológica do nitrogênio.

Absorção, transporte e redistribuição – o manganês é absorvido ativamente pelo sistema radicular da planta como  $Mn^{2+}$ . A presença de altas concentrações de outros cátions no meio diminui competitivamente a absorção do micronutrientes. O transporte do manganês no xilema, via corrente transpiratória, se faz na forma de  $Mn^{2+}$ , devido possivelmente a baixa estabilidade do quelado de Mn. O manganês é pouco redistribuído na planta, em conseqüência, os sintomas de carência se manifestam primeiro nas folhas mais novas.

---

Funções do manganês – as funções bioquímicas do  $Mn^{2+}$  lembram as do  $Mg^{2+}$ . Os dois nutrientes, ao desempenhar suas funções, formam pontes entre o ATP e as enzimas transferidores de grupos (fosfoquinases e fosfotransferases). No ciclo de Krebs operam descarboxilases e desidrogenases ativadas por  $Mn^{2+}$ , embora em alguns casos O  $Mg^{2+}$  possa substituí-lo. Outras enzimas têm exigência específica de Mn. A Tabela 3.18 mostra uma lista de enzimas de cuja atividade o Mn participa.

A função do Mn mais bem estudada em plantas é a sua participação, juntamente com o cloro (ver pág. 149), na evolução do  $O_2$  no processo fotossintético (quebra fotoquímica da água no fotossistema II), na reação de Hill. Quando a planta está deficiente em Mn, o fluxo de elétrons na reação de Hill é seriamente prejudicado, com correpondentes efeito negativos nas reações subseqüentes como a fotofosforilação do  $CO_2$  (ciclo de Calvin), redução do nitrito e do sulfato, cujo doador de elétron é a ferredoxina reduzida na reação de Hill. Em plantas deficientes em Mn tem sido observado acúmulo de  $NO_3^-$ . O efeito seria indireto: com uma menor redução do  $NO_2^-$  (nitrito), este acumulando exerce um “feedback” na atividade da redutase do nitrato; assim o  $NO_3^-$  também acumula. Parece, também, que o Mn está envolvido na formação, multiplicação e funcionamento dos cloroplastos.

**TABELA 3.18 Enzimas ativadas pelo manganês e por outros cátions (em ordem decrescente de eficiência)**

Nome	Reação	Fonte	Metal exigido
Sintetase do Glutathione GSH	Glutamil cisteína + glicina + ATP → GSH + ADP + P	Trigo Levedura	Mg, Mn, K, $NH_4$
Ativação da Metionina	Metionina + ATP → S-adenosil metionina + P	Levedura	Mg = Mn
ATPase	ATP → ADP + P	Cenoura, ervilha	Mg, Mn, Ca, Fe
Quinase Pirúvica	Pivurato + ATP → Fosfoenol piruvato + ADP	Sementes, folhas, Levedura, bactérias	Mg = Mn
Enolase	2-P glicerato → Fosfoenol piruvato + $H_2O$	Levedura	Mg, Mn = Zn
Desidrogenase Isocítrica	Isocitrato + NADP → Oxalalacetato + NADPH	Levedura	Mn, Mg

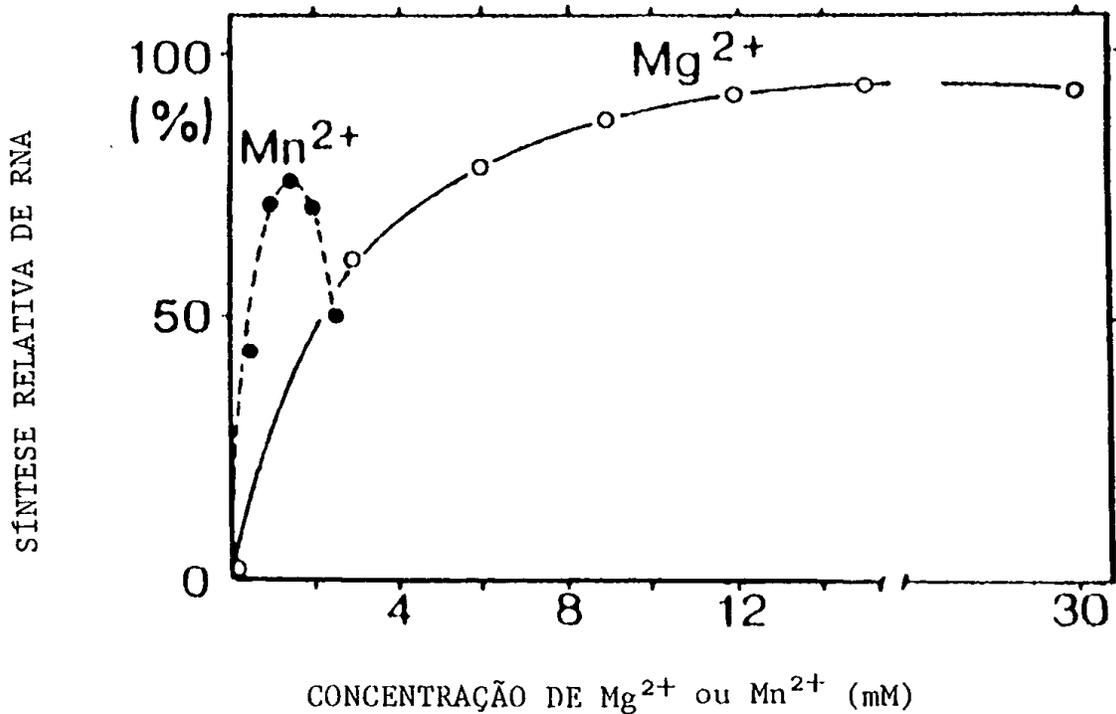
Continua...

Continuação tabela 3.18

Nome	Reação	Fonte	Metal exigido
Diocarboxilase Pirúvica	Piruvato → acetaldeído + + CO <sub>2</sub>	Levedura	Mg = Mn
Pirofosforilase	UDPG + PP → UTP + glicose – 1 – P	Sementes de Ervilhas e de outras espécies	Mg = Mn Mg = MN
Glutamil Sintetase	Glutamato + NH <sub>3</sub> Glutamina	Sementes de ervilhas	Mn, Mg
Glutamil Transferase	Glutamina + NH <sub>2</sub> OH (ou NH <sub>3</sub> ) glutamo hidroxamato ou troca de NH <sub>3</sub>	Idem	Mn, Mg
Enzima málica	Piruvato + CO <sub>2</sub> + NADPH metato + NADP <sup>+</sup>	Várias espécies	Mn
Oxidase do ácido Ácido Indoll Acético	AIA → Indol aldeído ou metilenoidol	Várias espécies	Mn

Fonte: HEWITT &amp; SMITH (1975).

A polimerase do RNA é outra enzima ativada pelo Mn, o que dá aos micronutrientes um papel indireto na síntese de proteínas e na multiplicação celular. Embora o Mg possa substituir o Mn na ativação de algumas enzimas, a ativação por Mn é mais eficiente. Um exemplo desta maior eficiência é mostrado na Figura 3.16 para a polimerase do RNA. Para a mesma atividade, a enzima requer uma concentração de Mg dez vezes maior do que a de Mn.



**FIGURA 3.16** Influência do magnésio e do manganês sobre a síntese de RNA em Cloroplasto

(Mess & Woolhoudr, 1980, em MARSCHNER, 1986).

Sintomas de deficiência e toxidez de manganês – como o Mn é pouco móvel na planta, os sintomas de deficiência se manifestam nas folhas mais novas que, inicialmente, mostram um amarelecimento internerval, que se diferencia da deficiência de ferro por formar um reticulado grosso: além das nervuras, uma estreita faixa de tecido ao longo das mesmas permanecem verdes. Muito mais freqüente que a deficiência, a toxidez de Mn tem-se manifestado em muitas culturas, mas que pode ser corrigida pela calagem. Freqüentemente, dada a interação do Mn com outros nutrientes, o seu excesso pode manifestar-se como deficiência induzida de cálcio, magnésio e, em especial, de ferro e, só posteriormente, como toxidez. Esta manifesta-se primeiramente nas folhas mais novas, através de pontuações de cor marrom ao longo das nervuras e também entre estas, que tornam-se necróticas, cercadas por zonas cloróticas. Nestes pontos ocorre acúmulo de óxido de manganês. As folhas das dicotiletôneas (feijoeiro, soja, aldoeiro) se deformam ficando encarquilhadas. O silício é capaz de diminuir o efeito tóxico do Mn, por proporcionar uma distribuição mais uniforme do micronutriente na lâmina foliar, impedindo a formação das pontuações marrons.

## MOLIBDÊNIO

O Mo é o micronutriente menos abundante no solo e o menos exigido pelas culturas. O Mo aparece no solo na forma aniônica ( $\text{HM}_6\text{O}_4^-$  e  $\text{M}_6\text{O}_4^{2-}$ ) e pode ser adsorvido ao solo, principalmente a óxidos, de maneira similar à que acontece com sulfato e fosfatos. Da mesma forma que acontece com estes ânions, à medida que aumenta o pH cresce a disponibilidade do Mo. A calagem pode, às vezes, corrigir a deficiência do elemento pelo aumento da sua disponibilidade.

- **Molibdênio na planta**

As crucíferas (repolho, couve flor) e as leguminosas são particularmente exigentes em Mo e são as que freqüentemente necessitam de adubação com o elemento. Plantas deficientes em Mo, normalmente, apresentam teores menores que 0,2 ppm na matéria seca das folhas. O nível crítico normalmente é menor que 1,0 ppm. Nos nódulos das leguminosas tem sido encontrados teores de Mo 10 vezes maior do que nas folhas.

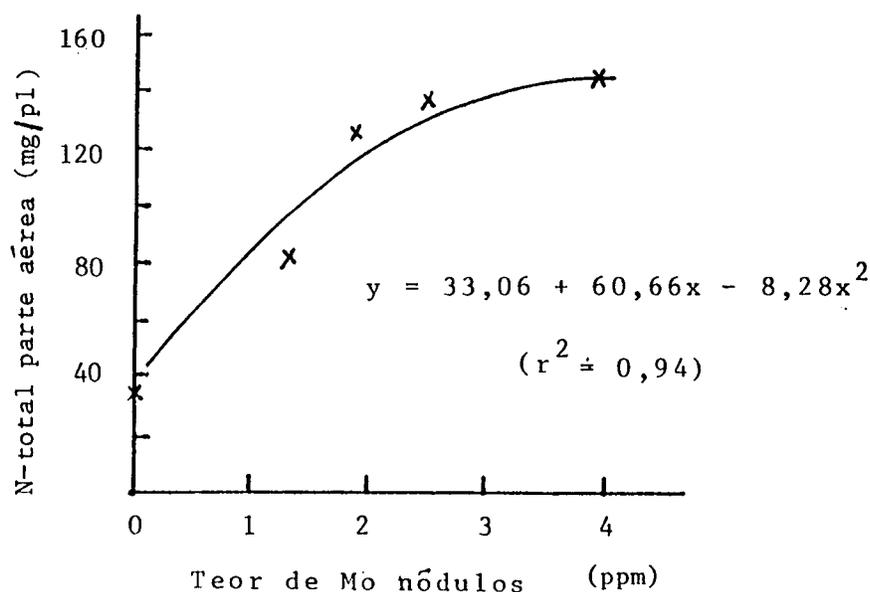
Absorção, transporte e redistribuição – em valores de pH do solo maiores do que 5, o Mo é absorvido predominantemente como  $\text{MoO}_4^{2-}$ . O  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  apresenta um efeito sinérgico na absorção e transporte do  $\text{MoO}_4^{2-}$ , possivelmente, pelo deslocamento do Mo dos pontos de adsorção no solo, tornando-o mais disponível e/ou formação do composto fosfomolibdato mais solúvel na membrana. Já o  $\text{SO}_4^{2-}$  apresenta efeito inibitório na absorção de  $\text{MoO}_4^{2-}$ . O transporte do Mo no xilema pode ocorrer como  $\text{MoO}_4^{2-}$ , ligado a grupos –SH de aminoácidos ou complexado a açúcares ou com outros compostos polihidroxilados. O Mo é considerado moderadamente móvel na planta.

Funções do Molibdênio – o Mo é componente de duas enzimas essenciais ao metabolismo de nitrogênio, a Redutase do Nitrato e a Nitrogenase, cujas funções já foram discutidas no item 3.2.1. A Redutase do Nitrato, como visto, é a enzima responsável pelo primeiro passo da redução assimilatória do nitrato ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ ) e contém além do Mo também o Fe. Plantas deficientes em Mo acumulam o  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$  e contém além do Mo também o Fe. Plantas deficientes em Mo acumulam o  $\text{NO}_3^-$  e podem apresentar deficiência de N. Com isso, o teor de clorofila é reduzido e o crescimento da planta é menor (Tabela 3.19.). A Nitrogenase, que também contém Mo e Fe, é o complexo enzimático responsável pela fixação biológica do  $\text{N}_2$  em microorganismos fixadores de vida livre ou simbióticos. Por esta razão é que a concentração de Mo nos nódulos é várias vezes maior do que aquela encontrada nas folhas das leguminosas. A aplicação do elemento junto às sementes de leguminosas no plantio tem sido recomendada e respostas em produção têm sido relatadas. Em feijoeiro nódulos colhidos na floração com menos de 3,6 ppm de Mo indicam deficiência (Figura 3.17.) e sementes com mais de 10 ppm de Mo podem desenvolver plantas auto suficientes no micronutriente (SIQUEIRA & FRANCO, 1989). Níveis até superiores de 10 ppm de Mo nas sementes podem ser obtidos com aplicação foliar. A produção de sementes com alto teor de Mo é viável e pode contribuir para a correção de eventuais do micronutriente nos solos tropicais. É possível

que além das duas funções mencionadas o Mo tenha outras, visto que plantas deficientes mostram menores teores de ácido ascórbico (Vitamina C) (Tabela 3.19.) e de açúcares.

**TABELA 3.19 Efeito do Mo e da fonte de N sobre o crescimento, clorofila e nitrato em tomateiro**

Tratamento	Mat.seca		Clorofla		Nitrato		Ác. ascórbico	
	(g / pl)		(mg / 100g M. Fresca)		(mg/g M.S.)		(mg / 100g M. Fresca)	
	-Mo	+Mo	-Mo	+Mo	-Mo	+Mo	-Mo	+Mo
Nitrato	9,6	25,0	8,9	15,8	72,9	8,7	99	195
Amônio	15,9	19,4	21,6	17,4	10,4	8,7	126	184



**FIGURA 3.17 Relação entre o teor de Mo nos nódulos e N-total na parte aérea do feijoeiro**  
(SIQUEIRA & FRANCO, 1988).

Sintomas de deficiência de molibdênio – algumas espécies mostram os sintomas de deficiência de Mo nas folhas velhas e outras nas folhas novas. As leguminosas, por exemplo, podem mostrar sintomas de falta de nitrogênio. Clorose malhada geral, manchas amarelo-esverdeadas em folhas velhas e depois necrose também têm sido descritos. As manchas necróticas que aparecem nas margens das folhas parecem ser devidas à acumulação de  $\text{NO}_3^-$ . Murcha das margens das folhas novas e encurvamento do limbo para cima (tomateiro) ou para baixo (cafeeiro) também têm sido observados. No

gênero brássica o “rabo de chicote (“Whiptail”)), que consiste de folhas novas que crescem quase desprovidas de limbo – cresce apenas a nervura principal – é um sintoma típico de deficiência de Mo, exigindo a aplicação foliar do micronutriente desde a sementeira da cultura.

## ZINCO

Nos solos das regiões tropicais uma alta proporção do Zn se encontra em formas adsorvidas na argila e na matéria orgânica. Estima-se que 30 – 60% do Zn adsorvido esteja preso ao  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Hidratado (goetita) e esta retenção aumenta com a elevação do pH, reduzindo a sua disponibilidade às plantas. A concentração de Zn na solução do solo é muito baixa, da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-6}\text{M}$ , a maior parte – cerca de 60% - como complexos orgânicos solúveis. Admite-se que nos solos brasileiros, dada a grande freqüência de deficiência do elemento em muitas culturas, as reservas do nutriente sejam pequenas ou que a disponibilidade seja baixa, ou ambas as coisas. A calagem dos solos ácidos como os do cerrado, elevando o pH, pode agravar o problema de deficiência.

### Zinco na planta

Ao lado do B, o Zn é o micronutriente que mais freqüentemente promove deficiência nas culturas nos solos das regiões tropicais. A concentração ótima de Zn, de acordo com as espécies, varia de 20 a 120 ppm na matéria seca das plantas. Deficiências do elemento são usualmente associadas com teores menores que 20 ppm e toxidez acima de 400 ppm.

Absorção, transporte e redistribuição – o zinco é absorvido pelas plantas na forma de  $\text{Zn}^{2+}$ . É ainda motivo de controvérsias se o  $\text{Zn}^{2+}$  é absorvido pelas plantas por processo passivo ou ativo, embora muitos trabalhos atestam que a absorção do elemento é tipicamente metabólica. Outros cátions em elevadas concentrações inibem competitivamente a absorção do Zn. Adubações pesadas com P podem induzir deficiência de Zn. As possíveis causas atribuídas a este antagonismo são: precipitação de compostos de P-Zn no solo; inibição não competitiva no processo de absorção; menor transporte do Zn das raízes para a parte aérea e, principalmente, o “efeito de diluição” pode ser entendido como a diminuição do teor de um determinado nutriente na matéria seca (no caso o Zn), devido ao crescimento da planta em resposta à aplicação de outro nutriente deficiente no meio (no caso o P). Assim, o crescimento da planta em resposta à aplicação do P, pode diluir o teor de Zn na matéria seca a valores abaixo do nível crítico, favorecendo o aparecimento de sintomas de deficiência do micronutriente. O zinco é transportado das raízes para a parte aérea pelo xilema, predominantemente na forma de  $\text{Zn}^{2+}$ , o que talvez se explique pela baixa constante de estabilidade dos quelantes orgânicos. Este fato ajuda a entender a diminuição do transporte do Zn no xilema, com o aumento do P no meio, devido à precipitação do micronutriente pelo fosfato. O Zn é pouco móvel na planta, particularmente nas plantas deficientes. Por isso os sintomas de carência aparecem nos órgãos mais novos.

---

Funções do zinco – a Tabela 3.20. apresenta uma relação de enzimas encontradas em plantas superiores e inferiores que contêm Zn. E esta é a principal função do Zn no metabolismo: componente e ativador enzimático, citando-se as desidrogenases (alcoólica, glutâmica e láctica), sintetases, carboxilases, isomerases. O Zn está estreitamente envolvido no metabolismo nitrogenado da planta. Em plantas deficientes em Zn, há redução da síntese protéica e acúmulo de aminoácidos e amidas. Três distintos mecanismos são responsáveis pelo efeito adverso da deficiência de Zn na síntese e conteúdo protéico nas plantas. Primeiro, o Zn é um componente da RNA polimerase, que pela polimerização de nucleotídeos, leva à síntese do RNA. Segundo, o Zn é um constituinte dos ribossomos, que atua na manutenção da integridade estrutural destas organelas. Em plantas deficientes em Zn há a desintegração dos ribossomos, mas com a aplicação do micronutriente, o processo volta ao normal rapidamente (Figura 3.18). Terceiro, é que o Zn regula a atividade da RNase, que atua na desintegração do RNA. Há clara correlação inversa entre o suprimento de Zn e a atividade da RNase e também entre a atividade da RNase e o conteúdo de proteínas e o crescimento da planta (Tabela 3.21.).

**TABELA 3.20 Algumas enzimas contendo Zn encontradas em plantas superiores e inferiores**

Enzima	Reação	Peso molecular e Zn	Fonte
Anidrase	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$	180.000	Salsa
Carbônica	$\text{HCO}_3 + \text{H}^+$	6 Zn / mol	
Isomeras de	Manose – 6 - P	45 000	Levedura
Fosfomanose	Frutose – 6 - P	1 Zn / mol	
Desidrogenase	Lactato + $\text{NAD}^+$	96 000	Levedura
Láctica	Piruvato + $\text{NADH} + \text{H}^+$	3 Zn / mol	
Desidrogenase	$\text{EtOH} + \text{NAD}^+$	144 000	Levedura
Alcoólica	Acetaldeído + $\text{NADH} + \text{H}^+$	42 n / mol	
Aldolase	Frutose – 1,6 – 2P	68 000	Levedura
	Gliceraldeído – P + Dilidroxiacetona – P	2 Zn / mol	Fungos, algas, Plantas Superiores (?)
Desidrogenase	Glutamato + $\text{NAD}^+$	1 000 000	Ervilha
Glutâmica	$\text{H}_2\text{O}$ Alfa aceto glutarato + $\text{NADH} + \text{NH}_4^+$	4 Zn / mol	
Caroxilase pirúvica	Piruvato + $\text{ATP} + \text{CO}_2$ Oxaloacetado + $\text{ADP} + \text{P}$	600 000 3 Zn / mol (também Mg)	Levedura
Sintetase	Indol + serina →	-	Geral

Triptofano

Triptofano

Fonte: HEWITT & SMITH (1975).

Escanear a Figura 3.18

**FIGURA 3.18** Efeito da omissão (por 6 dias) e reaplicação de Zn, no número de ribossomas em *Euglena*

(Prask & Plocke, 1971, em MARSCHNER, 1986).

**TABELA 3.21** Efeito do Zn cobre o crescimento, atividade da RNase e N-protéico em *Glycine wighii*

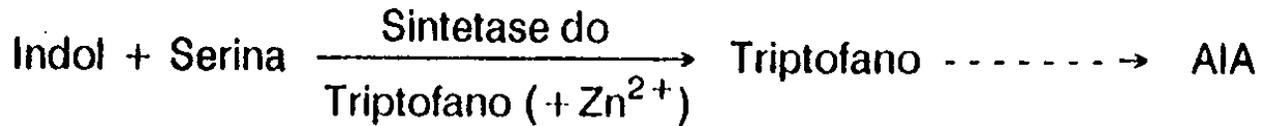
Zn (ppm)	Mat. Fresca (g / pl.)	Ativ. RNase (%)*	N-protéico (% Mat. Fresca)
0,005	4,0	74	1,82
0,01	5,1	58	2,25
0,05	6,6	48	2,78
0,10	10,0	40	3,65

\*percentagem de hidrólise do substrato RNA.

Fonte: Johnson & Simons (1979), em MARSCHNER (1986).

O Zn também está envolvido no metabolismo de auxinas, em particular no ácido indolil acético (AIA). Ainda não está bem entendida a participação do Zn no processo. O

baixo nível de AIA em plantas deficientes em Zn pode ser resultado da alta atividade da AA-oxidase. Muitos trabalhos suportam, também, que o Zn é requerido para a síntese do aminoácido triptofano, um precursor da biossíntese do AIA:



Parece que a “síntetase do triptofano” requer Zn para sua atividade. Em plantas deficientes em Zn, menores teores de triptofano e de AIA têm sido determinados.

Atribui-se a essas funções do Zn – participação na síntese de RNA e proteínas e, na síntese do AIA – os sintomas de deficiência do elemento (descrito abaixo) que as plantas apresentam, devido a uma menor divisão e alongação celular.

Como visto no item referente ao cobre, ao lado deste, o Zn participa do grupo prostético da dismutase de superóxido (Cu-Zn-SOD). Esta enzima catalisa a conversão do radical superóxido,  $O_2^-$ , para peróxido de hidrogênio mais oxigênio, (ver pág. 153), protegendo os tecidos das plantas dos efeitos deletérios causados pelo  $O_2^-$ .

Sintomas de deficiência de zinco – devido à pouca mobilidade, os sintomas de deficiência de zinco se manifestam nas folhas mais novas. Os sintomas mais típicos da carência do elemento consistem no encurtamento dos internódios e na produção de folhas novas pequenas, cloróticas e lanceoladas e formação de tufo na ponta de ramas das plantas perenes (roseta de laranjeiras, cafeeiro e pessegueiro) ou plantas anãs (milho, arroz, cana de açúcar).

## COBALTO

O teor de cobalto nos solos é bastante variado, citado de 1 a 40 ppm, sendo a maior proporção retida em óxidos de Mn, Fe e Al. Na solução do solo têm sido citados teores variando entre 0,007 – 0,2  $\mu\text{M}$ . O Co extraído com ácido acético 2,5% é considerado disponível às plantas; menos de 0,1 ppm de Co é indicação de deficiência. Calagem excessiva, teores elevados de Fe e Mn, pH elevado, conduzem à carência do elemento.

### Cobalto na planta

A essencialidade do Co restringe-se, por enquanto, às plantas superiores que dependem da fixação biológica do  $N_2$ . A concentração de Co na matéria seca varia entre 0,02 e 0,5 ppm. As leguminosas apresentam teores bem maiores do que as gramíneas. Há, entretanto, algumas espécies que acumulam o Co a valores altos da ordem de 500 – 800 ppm (Crotalaria cobalticola), até mesmo 1.000 ppm (Nyssa silvatica) – a presença dessas plantas indicam altos teores de Co no solo.

Absorção, transporte e redistribuição – o cobalto parece ser absorvido como  $Co^{2+}$ , sendo transportado das raízes para a parte aérea pelo xilema, via corrente transpiratória.

O Co tende também a formar quelados com compostos orgânicos. O excesso de Co no solo diminui a absorção do Fe e Mn, induzindo à deficiência dos mesmos. O elemento parece pouco móvel nas plantas.

Funções do cobalto – o Co é essencial para a fixação biológica do N<sub>2</sub> por bactérias fixadoras de vida livre ou por sistemas simbióticos. Em estudos sobre o efeito do Co na fixação simbiótica de bactérias do gênero *Rhizobium*, foi observado que o fornecimento do elemento aumentou a nodulação, o conteúdo da Vitamina B<sub>12</sub>, a formação de leghemoglobina e a fixação do N<sub>2</sub>. O Co constitui o grupo prostético da coenzima cobalamina (Vitamina B<sub>12</sub>). O sistema enzimático “Metilmalonil CoA mutase” no *Rhizobium* é especificamente dependente de coenzima cobalamina para a síntese dos grupos heme nos bacteróides, necessário para a produção da leghemoglobina nos nódulos. Como discutido no item 3.2.1 e Figura 3.3, a leghemoglobina tem a função de transportar O<sub>2</sub> para o metabolismo aeróbico do bacteróide, devido ao caráter anaeróbico da FBN. A deficiência de Co leva a uma menor concentração de leghemoglobina, o que afeta negativamente a FBN. Outros sistemas enzimáticos que atuam na síntese de proteínas e de DNA no bacteróide, são citados como dependentes da coenzima cobalamina (Vitamina B<sub>12</sub>) e, portanto, afetam a FBN.

Parece que o Co tem outras funções na planta não relacionadas com as cobamidas: em culturas assépticas de trevo subterrâneo não noduladas (cultivadas na presença de N combinado) e de milho foram obtidos sintomas de carência de Co quando o elemento foi omitido.

Na prática, respostas em produção de leguminosas à aplicação de Co têm sido obtidas. A sua aplicação normalmente é feita juntamente com o Mo no processo de inoculação das sementes.

O Co é importante não apenas na nutrição de leguminosas dependentes da fixação do N<sub>2</sub>, mas também para o aumento da qualidade nutricional de forrageiras, visto o mesmo ser um elemento essencial à nutrição animal. O nível crítico de Co na forragem para ruminantes é de aproximadamente 0,07 ppm na matéria seca.

Sintomas de deficiência e toxidez de cobalto – devido à participação do Co no processo de FBN, as leguminosas carentes no elemento mostram sintomas que lembram os de falta de N. Dada a sua imobilidade algumas plantas apresentam a deficiência em folhas novas como uma clorose. As folhas de plantas com excesso de Co são cloróticas, depois necróticas e, freqüentemente secam completamente. Como o excesso de Co no meio diminui a absorção de Fe e Mn por inibição competitiva, inicialmente, as plantas intoxicadas com Co podem apresentar deficiência destes dois micronutrientes, sugerindo também, o deslocamento dos mesmos compostos importantes no metabolismo.

## **NÍQUEL**

O teor de Ni no solo é geralmente baixo, normalmente menor que 100 ppm e bem abaixo do nível no qual a toxidez do elemento na planta ocorre. Entretanto, solos

---

originados de rochas ígneas ultrabásicas, particularmente de serpentinas, podem apresentar teores de Ni de 20 a 40 vezes maior e, neste caso, a toxidez do elemento nas plantas é comum. A disponibilidade de Ni para as plantas é regulada, em grande parte, pelas reações de adsorção entre o elemento e a superfície dos colóides – argila, óxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica. O pH do solo é outro fator importante, a calagem reduz a disponibilidade do elemento.

### Níquel na planta

A essencialidade do Ni para as plantas é ainda discutida, mas alguns autores já o colocam na lista dos micronutrientes; outros o colocam essencial apenas para algumas espécies de plantas e outros afirmam a necessidade de maiores estudos. ESKEW et al. (1984) e BROWN et al. (1987) demonstraram a essencialidade do Ni para leguminosas e cereais, respectivamente. Plantas adaptadas que crescem em solos originados de serpentina, podem apresentar até 3% de Ni na matéria seca. Nestas, uma alta proporção do elemento é complexado por ácidos orgânicos, o que contribui para esta tolerância, embora outros mecanismos também devem estar envolvidos.

Absorção, transporte e redistribuição – o níquel é absorvido da solução do solo como  $Ni^{2+}$  e compete com outros cátions no processo de absorção. Há evidências que o Ni seja móvel no floema; considerável quantidade de níquel é transferida para sementes e frutos.

Funções do Níquel – estudos têm mostrado que o Ni é um metal componente da urease, enzima que catalisa o desdobramento da uréia:  $CO(NH_2)_2 + H_2O \longrightarrow 2 NH_3 + CO_2$ . A enzima consiste de 6 subunidades com dois átomos de Ni em cada uma. Trabalhos em culturas de tecidos com soja, mostraram que na ausência de Ni a atividade da urease foi baixa e o crescimento pequeno, quando a fonte de N aplicada foi a uréia. A aplicação de Ni aumentou tanto a atividade da enzima quanto o crescimento, em mais de 5 vezes. Aparentemente, o níquel é essencial para plantas supridas com uréia e para aquelas nas quais os ureídeos (p. ex: alantoina) apresentam um importante papel no metabolismo do N. Nas leguminosas, os ureídeos são importantes formas de nitrogênio solúvel durante o transporte do N fixado dos nódulos para a parte aérea, bem como no floema, para as sementes. Os ureídeos também são metabolitos importantes no metabolismo do N no processo de germinação das sementes. Atribui-se a estimulação da germinação pelo Ni, à sua participação como componente da urease. Leguminosas cultivadas em solução nutritiva, contendo  $N-NO_3^-$  e  $N-NH_4^+$  como fontes de N, na ausência de Ni, apresentaram lesões necróticas nos folíolos, os quais continham 2,5% de uréia na matéria seca, sugerindo que a uréia é produzida durante o metabolismo normal do N nas plantas e que o Ni, como componente da urease, é requerido para prevenir o acúmulo de uréia a níveis tóxicos.

Sintomas de deficiência e toxides de Níquel – a obtenção de efeitos do Ni no crescimento de plantas e na indução de sintomas de deficiência do elemento, depende do

uso de soluções altamente purificadas e sementes de baixo conteúdo de Ni. Em condições muito severas de deficiência de Ni, ocorrem lesões necróticas nos folíolos como observado em soja e caupi, independente da forma de N utilizada (uréia, N – NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N – NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ou FBN). Clorose nas folhas novas e necrose em meristemas de tomateiro também têm sido relatados. A toxidade de Ni ocorre nos solos com elevado teor do elemento, como naqueles originados de serpentina. Dada a competição do Ni<sup>2+</sup> com o Fe<sup>2+</sup> e o Zn<sup>2+</sup> no processo de absorção, é comum observar inicialmente deficiência destes micronutrientes como o primeiro sintoma da toxidez de Ni. Nas gramíneas o sintoma de toxidez consiste em clorose ao longo das nervuras; a folha inteira pode tomar uma tonalidade esbranquiçada e, em casos extremos, há necrose nas margens. Nas dicotiledônea aparece uma clorose internerval, sintoma parecido com a deficiência de Mn.

---

## ELEMENTOS ÚTEIS E ELEMENTOS TÓXICOS

---

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

Foi destacado no item 1.3 que as plantas absorvem do solo, sem muita discriminação, todos os elementos químicos que se apresentam na forma disponível. Portanto, além dos elementos essenciais (macro e micro-nutrientes), as plantas absorvem outros elementos não essenciais que apresentam efeitos benéficos no desenvolvimento de certas plantas. Na beterraba e algodão, Al no chá, Si em gramíneas, bem como, outros que apresentam efeitos tóxicos para as plantas, mesmo quando presentes em pequenas quantidades. Convém lembrar que qualquer elemento pode tornar-se tóxico para as plantas quando presente em elevadas concentrações. Assim MALAVOLTA (1980) classifica os elementos minerais absorvidos pela planta do seguinte modo:

**essenciais** – são os nutrientes minerais da planta sem os quais a planta não vive;

**úteis** – não são essenciais, a planta pode viver sem eles; entretanto, a presença é capaz de contribuir de alguma forma no crescimento e produção da planta;

**tóxicos** – essenciais ou não, quando são prejudiciais à planta. Um elemento essencial é potencialmente tóxico, dependendo da sua concentração no meio.

### 4.2 ELEMENTOS ÚTEIS

Neste item, apenas dois elementos serão considerados: o sódio e o silício.

#### 4.2.1 Sódio

O teor de sódio em solos lançada intemperização da região tropical úmida é muito baixo ou nulo, não constituindo problemas para a agricultura. Nas regiões áridas e semiáridas, o Na poderá contribuir com 25% ou mais do total de cátions trocáveis e, nestas condições, as plantas cultivadas poderão apresentar problemas de toxide.

O efeito do Na para plantas varia desde elemento essencial para uma única planta halófito – *Atriplex versicaria* – até tóxico para outras. Certo número de membros da

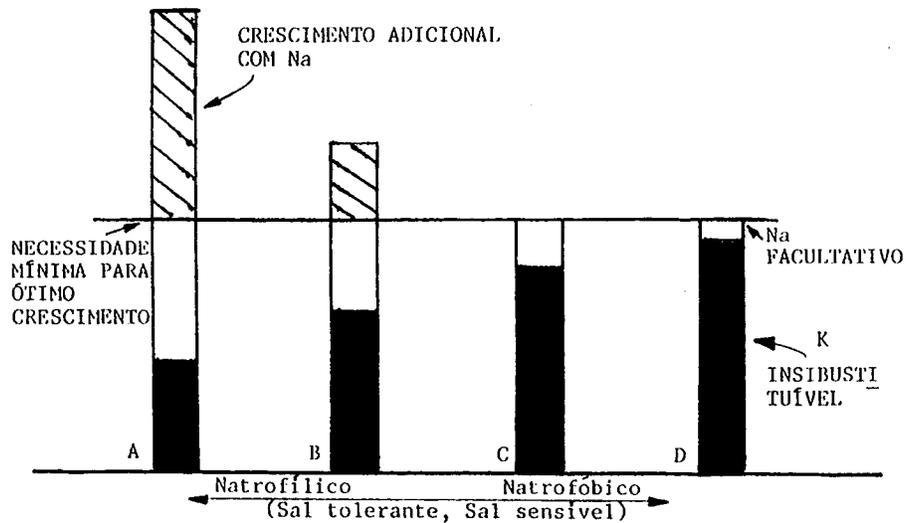
---

*Chenopodiaceae* beterraba forrageira, beterraba, espinafre – mostram efeitos positivos do sódio no crescimento, sempre na presença de níveis adequados de potássio.

As funções desempenhadas pelo Na em plantas ainda não são bem conhecidas. De acordo com MARSCHNER (1986), o papel do sódio na nutrição mineral de plantas superiores pode ser considerado como essencial, ou como substituto do K em algumas funções – metabólicas e osmóticas. A essencialidade do Na como um micronutriente foi estabelecida para a *Atriplex versicaria*. Esta halófito, quando crescendo em meio pobre em Na (abaixo de  $0,1 \mu\text{M}$ ), mostra sintomas de deficiência caracterizando como clorose e necrose foliar e pequeno crescimento, mesmo sob condições de altos níveis de K.

Respostas semelhantes a *Atriplex versicaria* à aplicação de Na têm sido obtidas para outras halófitas, todas sendo consideradas espécies que realizam a fotossíntese através do ciclo  $C_4$ . Para alguns autores, o Na é um micronutriente para plantas  $C_4$  e não para as  $C_3$ , mas o mecanismo de sua atuação ainda não é bem conhecido. Parece que o Na estaria envolvido na transferência de metabólitos entre os cloroplastos das células do mesófilo e da bainha vascular das plantas  $C_4$ . Apesar destes resultados, segundo MARSCHNER (1986) uma generalização das funções do Na destas espécies  $C_4$  natrofilas, para outras  $C_4$  natrofóbicas como o milho e o sorgo é ainda questionável. Relata-se também que a grande resposta em crescimento das halófitas ao Na é reflexo de um alto requerimento de sais para a regulação osmótica nestas plantas.

Os efeitos benéficos do Na em plantas não halófitas são relatados na literatura. Aceita-se de modo geral que, dependendo da planta, o Na pode substituir parcialmente o K – talvez em reações enzimáticas, nas quais não haja uma exigência absoluta de potássio e, possivelmente, nos seus efeitos puramente osmóticos. Em geral, estas espécies de plantas podem ser classificadas em quatro grupos de acordo com as diferentes respostas ao Na (Figura 4.1). No grupo A, além do alto grau de substituição do  $K^+$  pelo  $Na^+$ , um adicional crescimento é obtido, o qual não seria possível pelo aumento do conteúdo de K nas plantas. No grupo B, este efeito substitutivo é menor que no grupo A. No grupo C, apenas uma pequena proporção do K pode ser substituído pelo Na sem afetar a produção. No grupo D, nenhuma substituição pode ocorrer sem afetar a produção.



**FIGURA 4.1** Esquema tentativo de classificação das culturas de acordo com a capacidade de substituição do K pelo Na e o efeito do Na no crescimento adicional da planta. Grupo A: membros da Chenopodiaceae – beterraba forrageira, beterraba, nabo, acelga; Grupo B: repolho, rabanete, algodoeiro, ervilha, coqueiro, linho, trigo, espinafre; Grupo C: cevada, milho, arroz, aveia, tomate, batata; Grupo D: milho, centeio, soja alface (Lehr, 1953, Marschner, 1971, em MARSCHNER, 1986).

#### 4.2.2 Silício

O Si é o segundo elemento mais abundante na litosfera, depois do oxigênio. O Si está presente em minerais primários e secundários, com resistências muito diferentes ao intemperismo – máxima no caso do quartzo.

Com a intemperização dos minerais que contém, o elemento, na solução do solo o ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), isto em pH abaixo de 9,0. O ácido monossilícico sofre adsorção por óxidos de Al e de Fe, admitindo-se que o mecanismo seja semelhante ao que ocorre com o fosfato. Este fato é um efeito benéfico do Si, visto que a sua adição eleva a disponibilidade de P. O adubo termofosfato magnésiano apresenta em torno de 25% de  $SiO_2$ .

Em pH do solo abaixo de 9,0 o Si é absorvido na forma de ácido monossilícico não dissociado. O processo parece ser ativo, pois requer energia metabólica e é sensível a inibidores metabólicos e à temperatura. O Si é transportado no xilema como  $H_4SiO_4$  e a sua distribuição na planta está diretamente relacionada com a taxa transpiratória das diferentes partes da planta. Esta distribuição depende muito da espécie de planta: uniforme em plantas que acumulam pouco silício; noutras há maior proporção nas raízes; em plantas acumuladoras de Si, como o arroz, cerca de 90% está na parte aérea. A maior proporção do Si na planta está na forma de sílica amorfa hidratada ( $SiO_2 \cdot nH_2O$ ) e assim se torna imóvel na planta.

As diferentes espécies de plantas variam grandemente na capacidade de acumular Si nos tecidos, podendo ser divididas em acumuladoras e não acumuladoras. As acumuladoras incluem as gramíneas – por exemplo o arroz – as quais contêm de 10-15% de SiO<sub>2</sub> na matéria seca; este grupo inclui também alguns cereais, cana de açúcar e poucas dicotiledôneas, com teores bem mais baixos, na ordem de 1 a 3%. As não acumuladoras são dicotiledôneas, como as leguminosas, com teores menores que 0,5% de SiO<sub>2</sub>.

Em arroz, o Si se deposita nas células epidérmicas abaixo da cutícula, formando uma camada de sílica amorfa. Atribui-se a este fato um efeito benéfico do Si por limitar a perda de água por transpiração e dificultar a infecção por fungos na superfície foliar. Os resultados de pesquisas com o arroz são muito inconsistentes: alguns mostram efeitos benéficos na produção e inclusive aparecimento de sintomas de deficiência do elemento quando o mesmo foi omitido do meio; em outros trabalhos nenhum efeito foi observado.

Um outro efeito benéfico do Si tem sido atribuído ao aumento da tolerância das plantas à toxidez de Mn. O efeito não se traduz em menor absorção do Mn – o que ocorre é uma distribuição mais uniforme do Mn na lâmina foliar, impedindo a formação das pontuações marrons, sintoma típico de toxidez de Mn. Já para o arroz inundado, o Si aumenta o poder oxidante das raízes, diminuindo a absorção e a toxidez do Fe e Mn. Este mecanismo é explicado devido a uma melhor estruturação do aerênquima, proporcionando a oxidação destes elementos na superfície radicular, diminuindo a disponibilidade e a absorção dos mesmos.

### 4.3 ELEMENTOS TÓXICOS

O excesso de um determinado elemento químico no solo, pode ter diferentes origens, citando o próprio material de origem, resíduos urbanos (domésticos e industriais), poluição ambiental, adubos orgânicos e químicos.

A Tabela 4.1. mostra uma composição média do lodo de esgoto, do esterco de curral e do composto de lixo urbano quanto aos seus teores em metais pesados. Os valores mostram que o lodo de esgoto é o resíduo de maior perigo para a contaminação do solo, o qual na maioria das vezes é de caráter irreversível. A Tabela 4.2. mostra o enriquecimento do solo com diversos metais pesados após aplicação de 100 ton de lodo de esgoto por hectare na Holanda. O cádmio é o elemento que deverá limitar a aplicação deste resíduo no solo, de acordo com as quantidades máximas aceitas no solo para aquele país.

Os adubos minerais também possuem pequenas quantidades de metais pesados. As rochas fosfatadas geralmente contêm cádmio e outros elementos (Tabela 4.3.), que irão contaminar os adubos fosfatados. Na Tabela 4.4. pode-se observar as faixas de concentrações típicas de metais pesados em fertilizantes fosfatados e calcários.

Entretanto, a acumulação de metais pela planta depende da própria planta e de fatores do solo como pH, teor de matéria orgânica, concentração do metal e fatores

---

relativos ao manejo e ambientais, tais como umidade, uso de corretivos e fertilizantes, temperatura, etc.

**TABELA 4.1 Composição média e limites de variação de alguns metais pesados para o lodo de esgoto, esterco de curral e composto de lixo**

Elemento	Lodo de esgoto		Esterco de curral	Composto de lixo
	Média	Limites		
	----- Ppm -----		-----	-----
Hg	2	0-5	-	0,7
Co	10	0-100	-	-
Cd	20	0-300	-	0,4
Ni	150	10-1.300	-	58
Cu	250	1-3.000	200	163
Cr	500	10-50.000	-	105
Pb	700	50-50.000	-	115
Mn	500	50-2.500	400	1
Zn	3000	500-20.000	800	262
Fe	16.000	2.000-42.000	2.500	18.600

Fonte: Cottenie (1981) e Berton (1991), em BERTON (1992).

**TABELA 4.2 Enriquecimento do solo após aplicação de 100 ton de lodo de esgoto (matéria seca) por hectare, em solo da Holanda**

Elemento	Conteúdo no lodo	Elemento Aplicado	Aumento No teor	Quantidade máxima aceitável no solo
	g/l	kg/há	mg/kg	mg/kg
Hg	5	0,5	0,17	5
Co	25	2,5	0,83	50
Cd	50	5	1,66	3
Ni	200	20	6,66	50
Cu	1.000	100	33,33	50
Cr	1.000	100	33,33	100
Pb	1.000	100	33,33	200
Mn	1.000	100	33,33	400
Zn	3.000	300	100	300
Fe	18.000	1.800	600	-

Fonte: Cottenie (1981), em BERTON (1992).

**TABELA 4.3 Teores totais de metais pesados em algumas rochas fosfatadas**

Rochas Fosfatadas	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn
	-----		Ppm	-----	
Flórida (USA)	7	15	39	14	94
Kola (USSR)	1	2	2	40	24
Marrocos	11	3	69	39	222
Apatita de Araxá	7	36	118	72	740

Fonte: Adaptado de Forstener & Willman (1981) e Amaral Sob. Et al. (1992), em BERTON (1992).

**TABELA 4.4 Faixas de concentrações típicas de metais pesados em fertilizantes fosfatados e calcários**

Produto	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn
	-----		Ppm	-----	
Fertilizantes Fosfatados	0,1 – 170	7 – 225	7 – 30	1 – 300	50 – 1450
Calcários	0,04 – 0,1	20 – 1250	10 – 20	5 – 125	10 - 450

Fonte: Alloway (1990, em BERTON (1992).

Na Holanda, segundo BERTON (1992), as concentrações máximas aceitas no solo para alguns elementos são as seguintes:

Toxidade	Elementos
Muito tóxicos	Hg <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup> , CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Moderadamente tóxicos (1 a 100 ppm)	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Cr <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup>
Pouco tóxicos (> 1800 ppm)	Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , K <sup>+</sup> , Na <sup>+</sup>

Para as plantas e animais, MENGEL & KIRKBY (1987) apresentam a Tabela 4.5 com a concentração crítica para alguns metais pesados.

**TABELA 4.5 Concentração crítica de alguns metais pesados em plantas e na dieta de animais. Os níveis maiores são considerados tóxicos**

Elemento	Plantas	Animais
	ppm na matéria seca	
Cd	5 – 10	0,5 – 1
Hg	2 – 5	1
Tl	20 – 30	5
Co	10 – 20	10 – 50
Cr	1 – 2	50 – 3.000
Cu	15 – 20	30 – 100
Ni	20 – 30	50 – 60
Pb	10 – 20	10 – 30
Zn	150 – 200	500

Fonte: Sanerbeck (1982), em MENGEL & KIRKBY (1987).

Neste capítulo, como elementos tóxicos serão considerados: Alumínio (Al), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Bromo (Br), Iodo (I), Flúor (F), Selênio (Se) e Cromo (Cr), pois, mesmo em baixos teores no meio, são prejudiciais à maioria das plantas e, alguns, aos animais que as consomem.

#### 4.3.1 Alumínio

O Al é o cátion mais abundante na crosta terrestre, com participação na estrutura de vários minerais primários. A liberação de Al da fase sólida para a fase líquida do solo está diretamente ligada ao processo de acidificação do solo. Quando na solução do solo, os íons  $Al^{3+}$  sofrem o processo de hidrólise, formam hidróxidos incompletos de alumínio ainda solúvel e, portanto, tóxico para as plantas. Esta hidrólise constitui importante fonte de prótons ( $H^+$ ) no solo, ou seja, geradora de acidez. Em valores de pH maiores que 5,8 a 6,0, praticamente todo o Al aparece na forma insolúvel –  $Al(OH)_3$  – portanto, não tóxico para as plantas.

O Al é, sem dúvida, o efeito mais pernicioso da acidez do solo. Além do efeito fitotóxico das formas catiônicas solúveis, o Al está implicado na redução da disponibilidade e absorção de P do solo, e também na inibição competitiva da absorção de nutrientes catiônicos, como o  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e micronutrientes. Ainda não se conhece com exatidão as bases bioquímicas da fitotoxicidade de alumínio. O que se sabe é que a sua ação é mais pronunciada no sistema radicular, o que torna as raízes, indistintamente, mais grossas e curtas. Como consequência da diminuição da proliferação das raízes, há redução na capacidade de exploração de água e de nutrientes presentes no solo. Basicamente, essa alteração marcante no sistema radicular se deve ao efeito do alumínio no processo de divisão celular. O Al apresenta também uma ação danosa sobre as membranas celulares, ligando-se aos seus componentes, reduzindo drasticamente a sua permeabilidade. No

interior da célula, o Al pode ocasionar alteração na atividade de vários íons e metabólitos, com sérias implicações de fitotoxidez. O elemento concentra-se preferencialmente no núcleo e o sítio primário de ligação é o grupo fosfato do DNA, que reduz a atividade de replicação e de transcrição. Aceita-se também que o Al reaja com cadeias de ácidos poligalacturônicos das paredes das células novas das raízes, o que resulta na perda de elasticidade e por isto menor volume celular. O menor número de células e o conjunto de células menores, apresentam, como conseqüência, um sistema radicular constituído de raízes grossas e curtas.

Os primeiros sintomas de toxidez de Al, conforme já ressaltado, aparecem nas raízes, as quais tornam-se curtas e engrossadas, quebradiças e adquirem coloração amarronzada; é desprovido de ramificações finas, além de apresentar aparência coralóide. Na parte aérea, a toxidez é caracterizada por sintomas semelhantes àqueles de deficiência nutricional, notadamente fósforo, cálcio e potássio.

As espécies de plantas ou, até mesmo cultivares dentro de uma mesma espécie, têm demonstrado comportamento diferencial quanto à susceptibilidade, à toxidez de Al. A Tabela 4.6. apresenta este aspecto para algumas espécies vegetais, na qual se observa uma acentuada variação no comportamento de cultura para cultura. Os mecanismos de tolerância ainda não são bem conhecidos, embora alguns são propostos, os quais envolvem impedimento na aquisição do alumínio pelas plantas (exclusão) ou tolerância interna (inativação). Dentre estes mecanismos cita-se a alteração do pH induzida na rizosfera, reduzindo a solubilidade e a absorção do Al; complexação do Al por mucilagem no sistema radicular; complexação do Al por compostos orgânicos exsudados na rizosfera pelas raízes; mecanismos de tolerância interna, pela complexação do elemento por compostos orgânicos.

**TABELA 4.6 Níveis críticos de percentagem de saturação de alumínio no solo para algumas espécies vegetais**

Espécie	m (%)
Algodão	10
Alfafa	15
Aveia	15
Soja	20
Feijão	20
Cevada	30
Trigo	30
Milho	30
Arroz	45
Eucalipto	88

Fonte: Neves et al (1982) e Fageria et al (1988), em FAQUIN & VALE (1991).

### 4.3.2 Cádmi

No solo, em condições normais, raramente aparecem concentrações de Cd que podem promover toxidez às plantas.

Embora presente nos adubos fosfatados, a maior fonte de contaminação dos solos com o Cd se dá pela aplicação de lodo de esgoto e resíduos industriais (Tabela 4.1.). Refinarias de Zn, óleos lubrificantes e pneus, contribuem para a poluição do meio com Cd.

O elemento é absorvido pelas raízes na forma de  $Cd^{2+}$  e o aumento do pH reduz a sua disponibilidade e a absorção, como mostra a Tabela 4.7. Na prática, a calagem é uma prática recomendável para minimizar problemas de toxidez de Cd. A presença de Zn na solução restringe drasticamente a absorção de Cd pelas raízes. Nem todo o Cd absorvido é transportado para a parte aérea das plantas. Esta característica varia entre as espécies, com resultados mostrando uma variação que abrange de 10 a 50% da quantidade total absorvida.

**TABELA 4.7 Concentração de Cd em folhas de acelga influenciada pelo Cd adicionado ao solo e pelo pH**

Cd adicionado ao solo	pH do solo		
	4,5	5,2	7,4
Kg/há	Concentração na folha <sup>(1)</sup>		
	-----µg / g-----		
0	1,6	1,8	0,8
1	8,4	5,2	3,0
2	14	10	3,7
4	16	7,2	5,3

(1) Com base na matéria seca.

Fonte: Page (1981), em BERTON (1992).

As quantidades absorvidas deste metal depende da cultura explorada. A pesquisa tem mostrado que a cultura do fumo é particularmente acumuladora de Cd. O fumo é uma fonte importante de Cd para os seres humanos. Pessoas que fumam um maço de cigarros por dia têm uma concentração de Cd nos rins 50% maior do que uma pessoa não fumante. Alguns Estados que cultivam fumo nos EUA proibiram a aplicação do lodo de esgotos nos solos onde esta cultura é explorada. Nos animais o elemento se acumula nos rins e em menor proporção no fígado e no baço. O excesso provoca danos nos rins, inflamação na mucosa do nariz e efizema (distensão excessiva dos alveolos pulmonares).

Segundo MALAVOLTA (1980), os teores de Cd tidos como normais nas plantas variam de 0,5 a 1,0 ppm; efeitos tóxicos para o homem têm sido observados quando o

teor nas plantas consumidas como alimento excedem 3 ppm. A Tabela 4.5. mostra que os teores críticos de toxidez de Cd nas plantas podem ser maiores do que aqueles para os animais; o que torna-se um particular perigo, pois as plantas não necessariamente atuam como indicadores de toxidez de Cd para os animais. A quantidade máxima tolerável ingerida, recomendada pela Organização Mundial de Saúde (OMS) é de 400-500 µg Cd/dia. A principal causa da toxidez pelo Cd parece ser devida à sua combinação com os grupos tiólicos (SH) de enzimas e proteínas, provocando desarranjos no metabolismo.

### 4.3.3 Chumbo

O Pb é um dos maiores poluentes do meio, sendo muito tóxico para o homem. Nos solos, a concentração de Pb varia grandemente, de 2 a 200 ppm. Em Basaltos e Itabiritos de Minas Gerais, CURI & FRANZMEIR (1987) encontraram teores de Pb variando de 7,9 a 13,0 ppm. Os valores para solos derivados destas rochas também estão dentro desta faixa, sendo considerados valores comuns. A maior fonte do elemento para o ecossistema é o Pb-tetralito originado da combustão de combustíveis obtidos do petróleo, correspondendo a cerca de 80% do Pb adicionado, embora, outras fontes também são aplicadas ao solo, mas em menores quantidades, como o lodo de esgoto (Tabelas 4.1 e 4.2), rochas e adubos fosfatados e calcários (Tabela 4.3 e 4.4). O Pb, concentra-se na superfície do solo. O chumbo na forma iônica,  $Pb^{2+}$ , é pouco móvel no solo; as formas orgânicas como o Pb-tetraetilo, trietilo e dietilo, são extremamente móveis e chegam rapidamente às raízes das plantas.

As plantas cultivadas ao longo das estradas com tráfego pesado podem apresentar 50 ppm de Pb e aquelas a 150 m mostram muito menos nos tecidos vegetais - de 2-3 ppm. Grande parte do elemento concentra-se nas raízes, caules e folhas e pouco é transportado para as sementes, onde a concentração apresenta-se na ordem de 0,5 ppm. A elevação do pH diminui a disponibilidade e a absorção do metal pelas plantas. Portanto, a calagem é uma prática adequada para reduzir os problemas de toxidez com Pb, quando existentes.

O efeito tóxico de Pb para as plantas pode resultar na diminuição do crescimento, mas este feito não tem sido observado a campo e sim em estudos em solução nutritiva. O Pb absorvido se acumula nas paredes celulares, o que deve contribuir para diminuir seu efeito tóxico para a planta e seu transporte para os frutos. Ao que parece, tanto para as plantas quanto para os animais, a toxidez de chumbo está relacionada, pelo menos em parte, no metabolismo do Fe e formação dos grupos heme. O Pb está presente em alguns alimentos em teores muito variados: para a alface – 0,3 a 56 ppm, com média de 12 ppm; a couve – 0,2 a 2,3 ppm, com média de 1 ppm; a batata – 0,2 a 7,6 ppm, com média de 1,6 ppm; a cenoura – 0,2 a 11 ppm, com média de 4 ppm e, o feijão – 1 a 12 ppm, com média de 4 ppm (UNDERWOOD, 1977). A Tabela 4.5 mostra a concentração crítica de alguns metais pesados em plantas e na dieta dos animais, dentre eles o chumbo.

#### 4.3.4 Bromo

O teor de bromo no solo é muito baixo, razão pela qual a toxidez se manifesta naturalmente. O emprego de brometo de metila como fumigante do solo pode conduzir a sintomas de toxidez de Br, que lembram os provocados por salinidade: clorose e depois necrose das pontas e margens das folhas em expansão; a germinação das sementes é prejudicada.

Algumas espécies de plantas são tolerantes à toxidez de bromo, citando-se a cenoura, o fumo e o tomate. Estas espécies podem acumular até 2.000 ppm de Br nos tecidos sem apresentar sintomas de toxidez. Entretanto, níveis normais de Br em plantas crescendo em solo são usualmente baixos, na faixa de 0 a 260 ppm, sendo os valores mais baixos mais comuns. Outras plantas são citadas como sensíveis, citando-se o cravo, o crisântemo, a batatinha, o espinafre e a beterraba.

O bromo é absorvido pelas plantas como  $\text{Br}^-$  e o mesmo pode substituir o  $\text{Cl}^-$  em algumas funções, inclusive atenuando os sintomas de carência do último. A Tabela 3.13 apresentada no item referente ao colo, mostra que a fotólise da água ( $\text{O}_2$  envolvido) e a produção de ATP na fase clara da fotossíntese, ocorreram normalmente na presença do  $\text{Br}^-$  em lugar do  $\text{Cl}^-$ .

#### 4.3.5 Iodo

Naturalmente é difícil ocorrer toxidez de iodo em plantas. Os níveis do elemento na água refletem o conteúdo do mesmo nas rochas e solos de uma região e, conseqüentemente, os seus teores nas plantas. O seu conteúdo é menor em solos arenosos e maior nos argilosos e orgânicos.

As plantas absorvem o iodo da solução do solo como  $\text{I}^-$  e a presença do  $\text{Cl}^-$  diminui sua absorção. O teor de iodo nas folhas das plantas normais varia, normalmente, de 0,0 a 0,5 ppm e das intoxicadas mais de 8 ppm.

Teores de 0,1 ppm absorvem o iodo da solução do solo e em solução nutritiva tem sido relatado como estimulante, enquanto que níveis entre 0,5 e 1,0 ppm tornam-se tóxicos às plantas. No tomateiro, as folhas mais velhas amarelecem e caem enquanto as mais novas permanecem verdes; o crescimento diminui e as folhas se encurvam para a base, mostrando necrose nas pontas e margens.

O iodo é um elemento essencial aos seres humanos e animais. A tiroxina, é um hormônio sintetizado na glândula tiróide e contém na molécula quatro átomos grama de iodo por mol e desempenha importantes funções no organismo. O aparecimento de fenômenos carenciais de iodo é localizado em áreas bem determinadas, nas quais a água potável e as plantas utilizadas na alimentação são pobres no elemento. Neste caso, o uso de sal de cozinha iodado aos seres humanos e animais se reveste de grande importância. Uma série de distúrbios metabólicos ocorrem em organismos deficientes em iodo, dentre eles o aumento do diâmetro da glândula tireoíde, sintoma conhecido como bócio.

---

#### 4.3.6 Flúor

As plantas absorvem o flúor como  $F^-$  da solução do solo e o aumento do pH pela calagem diminui sua disponibilidade e absorção pelas raízes. Os baixos teores na maioria dos solos, a pequena disponibilidade e a pequena absorção, ajudam a explicar a baixa frequência de toxidez de F encontrada em plantas e os baixos teores encontrados nos tecidos: de 2-20 ppm. Algumas plantas são particularmente acumuladoras de F: o arbusto Sul Africano *Dichapetalum cymosum*, por exemplo, pode acumular mais de 200 ppm, o que é tóxico para os animais. O chá comercial também tem mostrado teores elevados de F, da ordem de 400 ppm. A quantidade de chá ingerida para se tornar tóxico deve ser muito elevada, o que normalmente não ocorre.

A toxidez de F em plantas pode ocorrer em áreas próximas às indústrias que lançam HF na atmosfera e os sintomas descritos são necrose marginal e clorose internerval das folhas.

Os efeitos da toxidez de flúor no metabolismo são citados: há aumento da atividade da desidrogenase-6-P, catalase, peroxidase, oxidase do citocromo; diminuição da atividade das enzimas ativadas pelo Mg e na absorção iônica.

#### 4.3.7 Selênio

Na maioria dos solos, o Se ocorre em baixas concentrações, geralmente menor que 0,2 ppm. Os solos originados de rochas sedimentares apresentam maiores teores do elemento. O selênio pode ocorrer em quatro estados de oxidação como selenato ( $SeO_4^{2-}$ ). Em solos com pH ácidos e próximos à neutralidade predomina o selenito e este sofre uma forte retenção pelas argilas do solo, especialmente pelo óxido de ferro.

O selenato é a forma predominantemente absorvida pelas plantas, aparece comumente apenas em solos alcalinos bem arejados. Nas plantas o selênio apresenta propriedades químicas muito parecidas com as do enxofre, podendo aparecer em aminoácidos sulfurados como selenometionina e selenocisteína. As plantas apresentam capacidade diferenciadas de absorção e acumulação de Se do solo. Existem plantas denominadas de seleníferas que acumulam milhares de ppm na matéria seca, sem apresentar efeitos tóxicos; plantas do gênero *Astragalus* são exemplos, que podem apresentar teores superiores a 20.000 – 30.000 ppm de Se, enquanto a maior parte das plantas não acumuladoras apresentam problemas de toxidez em concentrações maiores que 50 ppm.

Tem sido observado, às vezes, efeitos estimulantes em baixas concentrações de Se, embora é mais comum encontrar-se referência à sua toxidez. Esta manifesta-se na redução do crescimento da planta e as folhas tornam-se cloróticas.

O papel do Se na nutrição animal é bem mais conhecido. Sabe-se hoje que o Se é capaz de desempenhar certas funções atribuídas, originalmente, à Vitamina E. Estudos viando esclarecer esta relação, mostraram que o Se é componente de peroxidase do glutathione, cuja ação seria de controlar o nível de peróxido formados no metabolismo

---

animal; função esta desempenhada pela Vitamina E, que é um poderoso antioxidante e atua prevenindo a formação de peróxidos. A deficiência de selênio está associada a forragem com menos de 0,03 ppm na matéria seca e a solos com menos de 0,5 ppm. Cita-se como ideal teores de 0,1 a 1 ppm; concentrações acima de 5 ppm podem ser tóxicas provocando a chamada “doença da alcalinidade” que se manifesta como perda de pelos e penas, cascos e dentes malformados. Como o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) compete com o selenato ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) no processo de absorção, o emprego do primeiro na adubação pode contribuir para diminuir ou eliminar a toxidez de Se em solos ricos no elemento.

#### 4.3.8 Cromo

Nos solos, a maior parte do Cr não está na forma disponível, visto encontrar-se presente em compostos insolúveis de óxidos combinados com Fe e Al ou fortemente ligado às argilas. Solos originados de serpentina podem apresentar teores elevados do elemento. No Brasil são raras as informações sobre os teores de Cr em rochas e nos solos. Em Minas Gerais, CURI & FRANZMEIER (1987) encontraram para o Basalto 69 ppm de Cr e 220 a 300 ppm do elemento para solos derivados desta rocha e menos de 52 ppm em Itabirito, nos solos originados deste material. Uma fonte externa de Cr é o iodo de esgoto, como pode ser visto nas Tabelas 4.1 e 4.2.

MALAVOLTA (1980) relata que encontra-se na literatura menção do efeito estimulante do Cr na concentração de 0,5 ppm para o milho. Outros trabalhos têm mostrado uma inibição no crescimento de plantas em concentrações do elemento na solução nutritiva próxima de 1 a 2 ppm; e concentrações mais altas (5 a 15 ppm) aparecem sintomas visuais de intoxicação em plantas (BOLLARD, 1983), que geralmente compreende um mal desenvolvimento de raízes, no estrangulamento e na coloração vermelho pardacenta das folhas.

## NUTRIÇÃO MINERAL E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS

---

---

### 5.1 INTRODUÇÃO

No item 1.4. definiu-se a adubação como a adição de elementos (nutrientes) de que a planta necessita para viver, com a finalidade de obter colheitas compensadoras de produtos de boa qualidade nutritiva ou industrial. A adubação, melhorando o estado nutricional das plantas, tende a melhorar a qualidade do produto obtido. Mas, na prática, objetiva-se, primordialmente, o aumento da produtividade, visando a obtenção de maiores lucros em determinado investimento agrícola.

A produtividade e qualidade são fatores controlados geneticamente, mas também influenciados pelo meio: solo e clima. Infelizmente, por muitos e muitos anos, o melhoramento genético tem sido orientado para os interesses econômicos e industriais, tais como a produtividade, aparência, aceitabilidade, resistência a pragas e doenças, adaptabilidade a diferentes tipos de clima e de solos, que viessem ao encontro desses interesses, sem levar em consideração a composição e valor nutritivo dos alimentos. A preocupação em modificar geneticamente plantas e animais para melhoria do seu valor nutritivo é relativamente recente.

A definição da qualidade de um produto agrícola é bastante difícil e pode ser ao mesmo tempo objetiva e subjetiva. A qualidade dos produtos agrícolas, sob o ponto de vista da nutrição mineral, deve ser analisada pelos seguintes aspectos principais: qualidade biológica ou substâncias nutricionais básicas (proteínas, carboidratos, gorduras, vitaminas, minerais, etc), aparência (tamanho, forma, cor, etc) e sabor. A influência da nutrição na qualidade depende da participação dos nutrientes em processos biológicos e fisiológicos da planta. A Tabela 5.1. mostra a composição de alguns alimentos mais consumidos na alimentação do brasileiro, tanto de origem animal quanto vegetal. Observa-se que os vegetais (grãos, hortaliças, frutas) apresentam uma qualidade biológica bastante variada. E esta qualidade biológica bem como a aparência e o sabor, são bastante influenciadas pela nutrição mineral das plantas, como será discutido mais adiante.

---

As principais razões pelas quais o produtor é levado a tentar produzir produtos de melhor qualidade são citadas por HAAG (1992): consumidor mais exigente; volume de oferta às vezes excessiva; processamento industrial e, atendimento às normas de qualidade exigida pelos países importadores.

Os carboidratos constituem a principal fonte de energia para os animais e humanos. De modo geral, os mesmos contribuem de 50 até 80% das calorias totais na alimentação. Os países em desenvolvimento consomem principalmente os carboidratos de amidos de raízes, tubérculos e cereais, enquanto que nos países industrializados se consome uma proporção maior de açúcares, particularmente sacarose e glicose. A Tabela 5.1. mostra que os cereais são as principais fontes de carboidratos para a alimentação, embora outros produtos também apresentam quantidades variadas dos mesmos, principalmente as raízes e tubérculos.

As vitaminas são substâncias indispensáveis à vida animal e humana, em quantidades bastante reduzidas e devem ser providas ao organismo através da dieta, cuja ausência resulta em doenças carenciais. Muitas coenzimas – cuja definição foi dada no item 3.2. – contêm uma vitamina como parte de sua estrutura; essa relação é sem dúvida responsável pelo papel essencial da vitamina. Destaca-se as seguintes vitaminas com funções de coenzimas: Niacina ou Nicotinamida, que participa do NAD<sup>+</sup> (nicotinamida – adenina – dinucleotídeo) e NADP<sup>+</sup> (nicotinamida – adenina – dinucleotídeo – fosfato). Riboflavina, constituinte do FAD (flavina – adenina – dinucleotídeo); Ácido lipoico; Biotina e Tiamina; todas com papéis indispensáveis dentro do metabolismo. As frutas e hortaliças constituem dois grupos importantíssimos de alimentos cuja função nutricional é, principalmente, a de fornecer vitaminas e minerais para o organismo que as ingere (Tabela 5.1.). Algumas frutas e hortaliças são particularmente importantes como fontes de algumas vitaminas, a saber: vitamina C (laranja, goiaba, manga, morango, brócoli, couve flor, repolho); vitamina A (manga, mamão, pêssego, vagem, ervilha, cenoura e alface). As sementes de leguminosas apresentam elevadas concentrações de vitamina E, de tiamina e niacina.

O valor nutritivo das proteínas dos alimentos irá depender da quantidade e proporção dos aminoácidos considerados indispensáveis e da digestibilidade da proteína. Os alimentos de origem animal (carnes, peixe e derivados lácteos) e os de origem vegetal como os grãos e farinhas de leguminosas são particularmente ricos e as principais fontes de proteínas. De todas as proteínas dos alimentos de origem vegetal, as da soja são as que apresentam melhor composição de aminoácidos, assemelhando-se bastante às dos produtos animais. As proteínas dos principais cereais se apresentam deficientes, principalmente em lisina e em alguns casos (milho) em triptofanos. As proteínas dos grãos de leguminosas são, em geral, ricas em lisina, porém, bastante deficientes em aminoácidos sulfurados (metionina, cisteína e cistina).

As gorduras são importantes na alimentação e apresentam um elevado potencial energético. Embora as principais fontes de gorduras na alimentação sejam de origem

---

animal, os alimentos de origem vegetal também apresentam teores variados destes compostos. Destacam-se neste grupo a soja e o abacate (Tabela 5.1).

Os minerais formam a cinza dos materiais biológicos após completa oxidação da matéria orgânica. Grande parte dos minerais que formam o corpo dos animais aparece no esqueleto. Uma menor quantidade aparece formando parte da estrutura de macromolécula como as proteínas, fosfolipídeos, hemoglobina e muitas enzimas. Ainda outra parte aparece no interior das células na forma iônica, regulando o pH, a pressão osmótica e o equilíbrio eletrostático, bem como ativando enzimas. SGARBIERI (1987) cita que os minerais conhecidos como essenciais ao organismo são divididos em macronutrientes – nitrogênio, cálcio, fósforo, potássio, sódio, cloro, magnésio e enxofre; e micronutrientes – ferro, cobre, cobalto, manganês, zinco, iodo, flúor, molibdênio, selênio, cromo e silício – cada qual com funções específicas no organismo. As frutas e hortaliças são importantes fontes de minerais na alimentação.

**TABELA 5.1 Composição biológica de alguns alimentos mais consumidos na alimentação do brasileiro (por 100 gramas comestíveis)**

ALIMENTO	Água	Ener- gia	Proteína	Gordura	Carboidrato(g)		Cinza	Cálcio
	(%)	Kcal	(g)	(g)	Total	Fibra	(g)	(mg)
Trigo (Far.80%)	12,0	365	12,0	1,3	74,1	0,5	0,65	24,0
Batata (Coz.c/ pele)	79,8	76	2,1	0,1	17,1	0,5	0,90	7,0
Arroz (Pol. Coz.)	72,6	109	2,0	0,1	24,2	0,1	1,10	10,0
Milho (Farinha)	12,0	368	7,8	2,6	76,8	0,7	0,80	6,0
Feijão (Coz.)	69,0	118	7,8	0,6	21,2	1,5	1,40	50,0
Soja (Far. Int.)	8,0	421	36,7	20,3	30,4	2,4	4,60	119,0
Cenoura (Coz.)	91,2	31	0,9	0,2	7,1	1,0	0,60	33,0
Abóbora (Verde coz.)	95,6	14	0,9	0,1	3,1	0,6	0,40	25,0
Alface (Crua)	94,0	18	1,3	0,3	3,5	0,7	0,90	68,0
Tomate (Cru Mad)	93,5	22	1,1	0,2	4,7	0,5	0,50	13,0
Repolho (Cru)	92,4	24	1,3	0,2	5,4	0,8	0,70	49,0
Couve flor (Coz)	92,8	22	3,3	0,2	4,1	1,0	0,60	21,0
Berinjela (Coz)	94,3	19	1,0	0,2	4,1	0,9	0,40	11,0
Laranja	88,3	45,0	0,7	0,2	10,4	0,1	0,4	11,0
Abacaxi	85,3	52,0	0,4	0,2	13,7	0,4	0,4	17,0
Abacate (Int.)	74,0	167,0	2,1	16,4	6,3	1,6	1,2	10,0
Pêssego (Cru)	89,1	38,0	0,6	0,1	9,7	0,6	0,5	9,0
Maçã (Crua)	84,4	58,0	0,2	0,6	14,5	1,0	0,3	7,0
Uva (Crua)	81,6	69,0	1,3	1,0	15,7	0,6	0,4	16,00

Continua...

Tabela 5.1.-Continuação

<b>ALIMENTO</b>	<b>Água</b>	<b>Ener- gia</b>	<b>Proteína</b>	<b>Gordura</b>	<b>Carboidrato (g)</b>		<b>Cinza</b>	<b>Cálcio</b>	
Banana (Mad.)	75,7	85,0	1,1	0,2	22,2	0,5	0,6	8,0	
Carne Bovina (Coz)	60,0	219	27,4	11,3	0,0	0,0	1,30	12,0	
Carne Suína(Coz)	42,1	410	20,9	35,6	0,0	0,0	1,30	9,0	
Frango (Branca,Coz.)	63,8	166	31,6	3,4	0,0	0,0,	1,20	11,0	
Ovo (Galina Coz.)	73,7	163	12,9	11,5	0,9	0,0	1,0	54,0	
Leite (Vaca, Past.)	87,4	65	3,5	3,5	4,9	0,0	0,7	118,0	
<b>ALIMENTOS</b>	<b>Fósforo (mg)</b>	<b>Fer- ro mg</b>	<b>Sódio (mg)</b>	<b>Potássio (mg)</b>	<b>Vit. A (UI)</b>	<b>Tiamina (mg)</b>	<b>Riboflavi- na (mg)</b>	<b>Niacina (mg)</b>	<b>Vit. C (mg)</b>
Trigo (Far.80%)	191,0	1,3	2,0	95,0	0,0	0,26	0,07	1,4	0,0
Batata (Coz.c/pele)	53,0	0,6	3,0	407,0	t	0,09	0,04	1,5	16,0
Arroz (Pol. Coz.)	28,0	0,2	374,0	28,0	0,0	0,02	0,01	0,4	0,0
Milho (Farinha)	164,0	1,8	1,0	-	340	0,20	0,06	1,4	0,0
Feijão (Coz.)	148,0	2,7	7,0	416,0	0,0	0,14	0,07	0,7	0,0
Soja (Far. Int.)	558,0	8,4	1,0	1666,0	110,0	0,85	0,31	2,1	0,0
Cenoura (Coz.)	31,0	0,6	33,0	222,0	10500,0	0,05	0,05	0,5	6,0
Abóbora (Verde coz.)	55,0	0,4	1,0	141,0	390,0	0,05	0,08	0,8	10,0
Alface (Crua)	25,0	1,4	9,0	264,0	1900,00	0,05	0,08	0,4	18,0
Tomate (Cru Mad)	27,0	0,5	3,0	244,0	270,0	0,06	0,04	0,5	20,0
Repolho (Cru)	29,0	0,4	20,0	233,0	130,0	0,05	0,05	0,3	47,0
Couve flor (Coz)	42,0	0,7	9,0	206,0	60,0	0,09	0,08	0,6	55,0
Berinjela (Coz)	21,0	0,6	1,0	150,0	10,0	0,05	0,05	0,6	5,0
Laranja	17,0	0,2	1,0	200,0	200,0	0,09	0,03	0,4	50,0
Abacaxi	8,0	0,5	1,0	146,0	70,0	0,09	0,03	0,2	17,0
Abacate (Int.)	42,0	0,6	4,0	604,0	290,0	0,11	0,20	1,6	1,4
Pêssego (Cru)	19,0	0,5	1,0	202,0	1300,0	0,02	0,05	1,0	7,0
Maçã (Crua)	10,0	0,3	1,0	110,0	90,0	0,03	0,02	0,1	4,0
Uva (Crua)	12,0	0,4	3,0	158,0	100,0	0,05	0,03	0,3	4,0

Continua.....

Tabela 5.1-Continuação...

ALIMENTOS	Fósforo (mg)	Ferr o (mg )	Sódio (mg)	Potássio (mg)	Vit. A (UI)	Tiamina (mg)	Riboflavi- na (mg)	Niacina (mg)	Vit. C (mg)
Banana (Mad.)	26,0	0,7	1,0	370,0	190,0	0,05	0,06	0,7	10,0
Carne Bovina (Coz)	230,0	3,5	48,0	558,0	20,0	0,09	0,23	6,0	-
Carne Suína(Coz)	213,0	2,7	-	-	0,0	0,47	0,21	4,2	-
Frango (Branca,Coz.)	265,0	1,3	64,0	411,0	60,0	0,04	0,10	11,6	-
Ovo (Galina Coz.)	205,0	2,3	122,0	129,0	1180, 0	0,09	0,28	0,1	0,0
Leite (Vaca, Past.)	93,0	T	50,0	144,0	140,0	0,03	0,17	0,1	1,0

FONTE: Composition of Foods (Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, agriculture Handbook nº 8). Washington, D.C., 1963 em SGARBIERE (1987).

## 5.2 EFEITO DOS NUTRIENTES NA QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS

Como discutido no item 3.2., os nutrientes desempenham funções estruturais (componente de compostos orgânicos), participam como constituintes e na ativação enzimática da planta. Portanto, os minerais estão envolvidos em todos os processos metabólicos (tanto catabólico quanto anabólico) das plantas, bem como, atuam na regulação osmótica do vegetal. Sendo assim, a nutrição mineral da planta está envolvida diretamente na sua produtividade e na qualidade do produto obtido. Deve-se lembrar também que, à exceção do Boro, todos os outros elementos essenciais às plantas, também o são aos animais e ao homem.

A seguir, serão apresentados alguns exemplos para algumas culturas exploradas no País, que demonstram a relação entre a nutrição mineral e a qualidade dos produtos agrícolas, sem no entanto pretender fazer aqui uma revisão exaustiva a respeito do assunto.

### 5.2.1 Efeito sobre tubérculos, raízes e produtoras de açúcar

O potássio é um nutriente particularmente exigido pelas plantas produtoras de carboidratos, visto as suas funções no metabolismo, citando-se a sua participação no processo fotossintético, transporte dos carboidratos da fonte (folhas) para o reservatório (tubérculo, colmo, etc) e ativador da enzima sintetase do amido. A Tabela 5.2 mostra que aumentando a dose de adubo potássico, aumenta-se também o teor de amido da batatinha. Considerando uma produção de 40 t/ha, o aumento de 1% no teor de amido,

significa 400 kg/ha de amido adicionais. Além disso, a produtividade aumenta, reduzindo a taxa de tubérculos refugos de baixo valor comercial. Mas, de acordo com MENGEL & KIRKBY (1987) doses muito pesadas de K (> 800 kg K<sub>2</sub>O/ha) podem reduzir o teor de carboidratos na batata, particularmente se a fonte utilizada for o KCl.

**TABELA 5.2 Efeito de doses de potássio no teor de amido em tubérculos de batata**

Kg K <sub>2</sub> O/há	% amido
0	14,0
80	14,3
120	14,9
160	15,0

Fonte: Gruner (1983), em MALAVOLTA (1989).

A qualidade industrial da batata também é afetada pela nutrição potássica. O escurecimento da batatinha quando cortada e exposta ao ar ou ao fritar na produção do “chips” é devido ao acúmulo de dihidroxifenilalanina, um derivado do aminoácido tirosina, que se acumula na planta deficiente em K.

Outras tuberosas nas quais os carboidratos são os principais compostos de reserva, como a batata-doce, mandioca, inhame (*Discorea* sp) e outras, respondem similarmente à nutrição potássica. Em mandioca, tem sido relatado que a adubação potássica, não só aumenta o teor de amido nas raízes, mas também diminui o do venenoso glicosídeo cianogênico.

Em cana-de-açúcar, resultados de pesquisas têm mostrado uma estreita relação entre o conteúdo de K nos colmos com a produção de açúcar, açúcares totais, percentagem de sacarose e pureza do caldo e uma relação inversa com os açúcares redutores, como mostra a Tabela 5.3. Observa-se que no teor mais elevado, mesmo reduzindo a produtividade de colmos, a produtividade de açúcar (t / ha) foi compensada pela melhora na qualidade. Por outro lado, um elevado teor de K na planta, também provoca efeitos negativos na fabricação do açúcar, devido aumentar o teor de cinzas, que dificulta a cristalização. Mas, este efeito é favorável na fabricação de álcool, pois os constituintes da cinza do caldo agem como fonte de nutrientes para o processo fermentativo, aumentando a velocidade de desobramento dos açúcares em álcool. O teor de P no caldo também é importante no processo industrial da cana, pois o mesmo está envolvido no processo de clarificação.

**TABELA 5.3 Relação entre o teor de K no colmo maduro de cana de açúcar e o conteúdo de açúcar, produtividade e pureza**

K colmo (%)	Sacarose (%)	Açúcares redutores (%)	Produtividade Colmo (t/ha)	Produtividade açúcar (t/ha)	Pureza Caldo
0,68	37,5	11,8	159	15,0	81,7
1,22	41,7	6,4	191	19,7	85,2
1,47	46,2	5,7	176	24,6	88,2

Fonte: Humbert (1968), em PRETTY (1982).

A adubação nitrogenada na cana está, normalmente, associada a um maior crescimento vegetativo e, portanto, maior umidade da cana. Vários autores reconhecem que a adubação nitrogenada pode reduzir o teor de sacarose dos colmos, devido ao aumento do teor de umidade. Cita-se também, que o N força a vegetação e a produção de aminoácidos e proteínas, reduzindo o “Pol % cana” e elevando a percentagem de açúcares redutores.

### 5.2.2 Efeito sobre produtoras de grãos (cereais e oleaginosas)

Os cereais trigo, milho e arroz são fontes importantes de carboidratos e proteínas na alimentação humana e os seus teores e qualidade estão também relacionados com a nutrição mineral da planta. Comparando com os grãos das leguminosas o teor de proteínas nos cereais é bastante baixo.

O trigo contém de 9 - 15% do peso seco como proteínas, o que é bastante baixo, e o aumento nestes valores é algo desejável para a melhoria na qualidade da alimentação humana, bem como nas características de panificação. Nas proteínas dos cereais, os aminoácidos lisina, treonina e triptofano, essenciais para o homem, estão presentes em pequenas quantidades. Como o N faz parte dos aminoácidos e proteínas, as adubações nitrogenadas, normalmente, aumentam a produtividade e os teores protéicos nos cereais. A Tabela 5.4 mostra que a aplicação de N no trigo, nas doses de 40 ou 60 kg/ha em cobertura na época do florescimento, aumentou tanto a produtividade quanto a sua qualidade, expressa em teor de proteína e qualidade de panificação.

**TABELA 5.4 Efeito da aplicação adicional de N na época do florescimento sobre o teor de proteína e qualidade de panificação do trigo**

Parâmetro	Testemunha (80 kg N/ha no plantio)	+ 40 kg N/ha (florescimento)	+ 60 kg N/há (florescimento)
Prod. Grãos (t/ha)	4,59	4,98	5,24
Proteína	11,90	12,7	13,3
Valor Sedimentação	28	30	34

Fonte: Kürten (1964), em MENGEL & KIRKBY (1987)

Dentre os cereais, o arroz é o que apresenta o mais baixo teor de proteínas ( $\pm$  8,5%). Cerca de 90% do grão de arroz polido é constituído de carboidratos e proteína. No Brasil, o aspecto físico e a aparência são os principais indicadores da qualidade do arroz, independente do valor nutricional do produto. Estas características são tamanho do grão, translucidez, forma e percentagem de grãos inteiros. Como valor nutricional, citam-se as propriedades do amido e o teor de proteína, além de outros constituintes encontrados em menores quantidades como vitaminas e sais minerais; estes constituintes são muito afetados pela adubação mineral devido à influência que cada nutriente exerce nos processos bioquímicos e fisiológicos na planta.

Como o valor nutritivo de uma proteína está na dependência de sua composição em aminoácidos essenciais, pode-se dizer que o arroz possui uma proteína de boa qualidade, devido seu teor relativamente alto de lisina. Nos outros cereais, a proteína é pobre em lisina que é o primeiro aminoácido essencial em cereais.

O arroz responde bem à adubação nitrogenada. Análises do teor de proteína em seis linhagens cultivadas nas Filipinas indicaram aumentos médios de 7,2 a 9,5% quando o nível de N variou de 0 a 150 kg N/ha. Aumentos no teor de proteína não refletem necessariamente num melhor balanço de aminoácidos essenciais. Em geral, quando ocorre um aumento no teor de proteína, diminui o conteúdo de lisina. O beneficiamento e o polimento do arroz retira grande parte da proteína do grão. A Tabela 5.5. mostra que o aumento das doses de N promovem um incremento na produção de proteína (kg/ha) em três cultivares de arroz irrigado. O rendimento de proteína e os teores de lisina e treonina, quando o arroz foi beneficiado, foi muito menor do que os do arroz integral, o que se explica pelo beneficiamento que retira grande parte da proteína do grão.

**TABELA 5.5 Efeito de doses de N e do beneficiamento sobre o rendimento de proteína (kg/ha) de três cultivares de arroz irrigado (média de 2 anos)**

Nitrogênio (kg/há)	Satur		Dawn		Bluebelle	
	Integral	Beneficiado	Integral	Beneficiado	Integral	Beneficiado
0	193 <sup>a</sup>	159a	176a	140a	206a	167a
90	320b	251b	299b	214b	306b	241b
135	358b	272b	338c	236c	346b	267b

- Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si (5%).

Fonte: Patrick & Hoskins (1974), em BARBOSA FILHO e FONSECA (1989).

Parece que os efeitos do K na qualidade do arroz são indiretos, por exemplo, possibilitando um maior período de enchimento dos grãos com assimilados. Alguns resultados têm mostrado que o aumento das doses de K não influenciou o teor de proteína no arroz.

O S faz parte de importantes aminoácidos essenciais (cisteína e metionina). A deficiência de S pode reduzir o teor desses aminoácidos nos grãos, o que diminui o valor nutritivo do produto.

Diversos trabalhos demonstram que o aumento no teor de proteínas no milho e no sorgo, com a adubação nitrogenada, na maioria das vezes, está ligado ao aumento da zeína, uma proteína do grupo das prolaminas, de baixa qualidade nutritiva. A adubação nitrogenada aumenta a produtividade e o teor protéico no milho (Tabela 5.6), mas, de maneira geral, ocorrem alterações no equilíbrio de aminoácidos. Os dados da Tabela 5.7 mostram os valores de correlação entre a concentração de aminoácidos e o teor total de proteína, onde se verifica a correlação negativa e significativa para a maioria dos aminoácidos estudados; isto é, o aumento do teor total de proteína levou ao decréscimo da concentração de vários aminoácidos, inclusive os essenciais. Em sorgo granífero, pesquisas têm mostrado que o teor de proteína druta variou linearmente com a adubação nitrogenada no intervalo de 0 a 300 kg N/ha. A equação ajustada permitiu verificar um aumento de 1,6 kg de proteína para cada 100 kg de N aplicado.

**TABELA 5.6** Efeito da adubação nitrogenada na produção e no teor de proteína no milho irrigado

Doses N (kg/há)	Grãos (kg/ha)	Proteína (kg/ha)	Aumento proteína (%)
0	4.700	352,5 (7,5) <sup>(1)</sup>	-
88	6.477	550,5 (8,5)	56
196	7.048	648,4 (9,2)	84

<sup>(1)</sup> O número entre parênteses = % proteína total .

Fonte: Arnon (1975), em VASCONCELOS (1989).

Outros nutrientes também afetam a produção total e a qualidade das proteínas nos cereais. Portanto, uma adubação balanceada é essencial para aumentar a qualidade e a qualidade protéica nos grãos: interações neste sentido têm sido observadas com o N x K x N x S. Com relação ao P, é mais aceitável o aumento na produção de proteína por área (kg/ha) em consequência do aumento de produção, do que aumento no teor protéico, como observado no caso da adubação nitrogenada.

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos alimentos básicos na dieta do povo brasileiro, sendo considerado como a principal fonte de proteína sob o aspecto quantitativo e ocupando o terceiro lugar em termos de fornecimento de energia (11,1%), sendo apenas suplantado pelo arroz (24,2%) e açúcar (14,2%), da necessidade diária em calorias pela população brasileira (SGARBIERI, 1987). Em 150 cultivares existentes na coleção do instituto agrônomo de Campinas, verificou-se que o teor de proteína bruta (% N x 6,25) variou de 19,0 a 34,0%, com média de 25%. A quantidade da proteína do feijão, do ponto de vista nutricional, é afetada negativamente pelo baixo conteúdo de aminoácidos sulfurados (metionina e cistina), por outro lado, é rica em lisina. Já os cereais (milho, trigo) são pobres em lisina, entretanto apresentam níveis adequados dos aminoácidos sulfurados, o que permite o equilíbrio na alimentação básica do brasileiro. O feijão fornece ainda vitaminas (B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, niacina) e sais mineais como o K, P, S, Na, Ca, Mg, Fe.

**TABELA 5.7** Correlação entre o teor total de proteína e os teores de aminoácidos em grãos de milho

Aminoácidos	r
Lisina	- 0,904**
Treonina	- 0,721**
Cistina	- 0,556*
Leucina	0,328 n.s.
Valina	- 0,546 n.s.
Arginina	- 0,822**
Aspártico	- 0,824**
Glicina	- 0,902**
Serina	0,352 n.s.

Fonte: Keeney (1970), em VACONCELOS (1989)..

O comportamento dos teores de proteína no feijão em relação à adubação nitrogenada tem sido variado (ARF, 1989). O aumento da produtividade sempre ocorre com a adubação nitrogenada, mas os teores de proteína, em alguns trabalhos, mostram correlação positiva e em outros negativa. É interessante conhecer além da composição protéica, a proporção dos aminoácidos essenciais. A Tabela 5.8. mostra que o aumento da dose de N promove variações nos teores dos aminoácidos componentes da proteína. A maior dose de N aplicada (100 kg/ha) promoveu aumento nos teores de Lisina, cistina e leucina na proteína dos grãos, enquanto os teores de valina, treonina e metionina diminuíram e os demais pouco variaram.

A soja é outra leguminosa muito importante na alimentação humana e uma excelente fonte de proteína e calorias. Apesar de maior quantidade em termos de qualidade, a proteína da soja é inferior à dos animais, apresentando, tal como o feijão, baixo teor de aminoácidos sulfurados – metionina e cistina. A soja apresenta um alto teor de aminoácidos sulfurados – metionina e cistina. A soja apresenta um alto teor de óleo, sendo uma excelente fonte de energia ao organismo (Tabela 5.1.). Além disso, é uma razoável fonte de minerais como o Fe, Na e K, bem como de vitaminas.

**TABELA 5.8** Efeito de doses de nitrogênio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) no teor de aminoácidos de sementes de feijão cv Aroana, cultivadas em campo

Aminoácidos	Kg N/há		
	0	50	100
	(g de aminoácidos/16 g de N)		
Lisina <sup>(1)</sup>	6,69	7,58	7,35
Arginina	8,92	9,53	8,85
Ácido aspártico	11,29	7,77	8,45
Treonina <sup>(1)</sup>	5,27	4,98	4,65
Serina	5,46	5,33	5,10
Ácido Glutâmico	12,24	11,73	11,95
Prolina	2,61	3,42	3,60
Glicina	3,65	3,71	3,20
Alanina	3,37	3,57	3,35
Cistina	-	-	0,95
Valina <sup>(1)</sup>	7,73	5,77	4,65
Metionina <sup>(1)</sup>	2,37	1,32	1,95
Isoleucina <sup>(1)</sup>	9,44	7,48	9,05
Leucina <sup>(1)</sup>	10,96	10,31	11,15
Tirosina	3,76	3,57	3,20
Fenilalanina	5,65	6,06	5,50

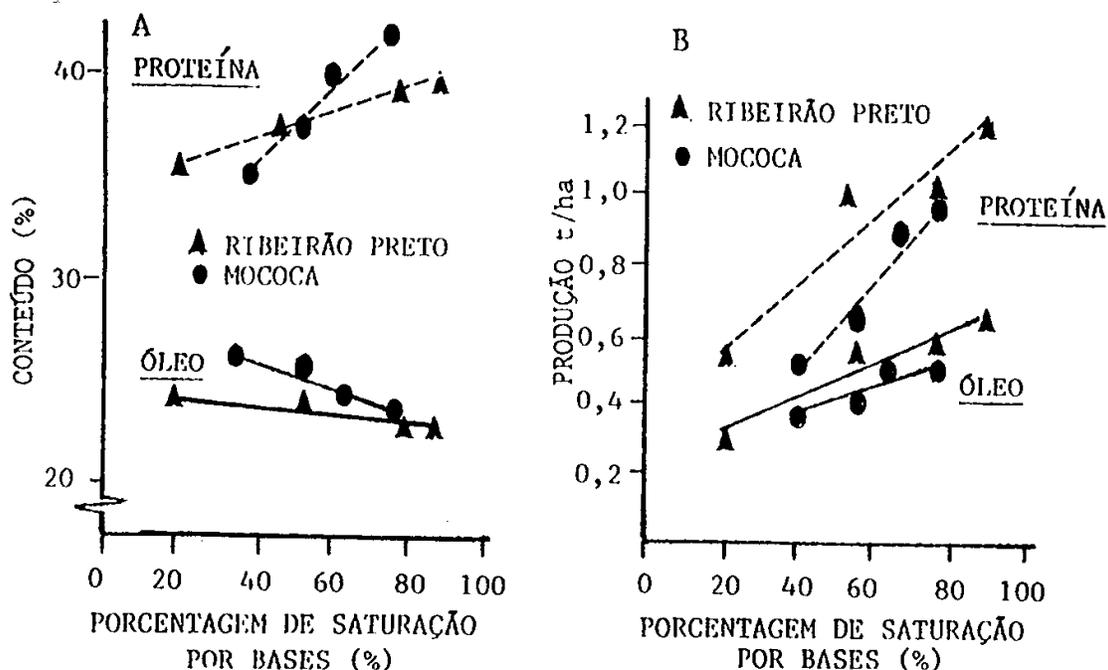
(1) Aminoácidos essencial.

Fonte: Carell et al (1981), em ARF (1989).

Dado às suas funções no metabolismo das proteínas e dos lipídeo,s a aplicação principalmente de N, P, K e S aumentam a produtividade da soja, bem como as suas qualidades protéica e calórica são afetadas. A aplicação de doses crescentes de N, em geral, diminui o teor de óleo e faz aumentar o de proteína nos grãos. O aumento das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  comumente faz subir o conteúdo de óleo. Tem-se observado uma relação inversa entre os teores de óleo e de proteína na soja. Para a adubação potássica este fato tem sido destacado: há um aumento no teor protéico do grão e uma diminuição no de óleo. Tem-se observado uma relação inversa entre os teores de óleo e de proteína na soja. Para a adubação potássica este fato tem sido destacado: há um aumento no teor protéico do grão e uma diminuição no óleo. Este fato pode ser entendido pela participação do K no processo de síntese protéica nas plantas, como visto no ítem referente às funções do N.

A calagem também afeta a produtividade e a qualidade da soja. Recentemente TANAKA et al. (1991) mostraram o efeito da calagem na produção de proteína e de óleo pela soja cultivada nas Estações Experimentais de Ribeirão Preto e Mococa no Estado de São Paulo. Foram aplicadas doses crescentes de calcário dolomítico, a fim de aumentar

os níveis de saturação de bases no solo. Na Figura 5.1.A observa-se que com o aumento da saturação de bases, houve um aumento no teor percentual de proteína e diminuição no de óleo. Considerando a produção total de grãos, o aumento da saturação de bases promoveu incremento em ambos, produção de proteína e de óleo em t / ha (Figura 5.1.B)



**FIGURA 5.1** Percentagem de saturação de bases e concentração de proteína e óleo (A) e produção de proteína e óleo por t/ha (B).

(TANAKA et al. 1991).

### 5.2.3 Efeito sobre as hortaliças e frutas

Para as hortaliças, além da qualidade nutricional – que o consumidor não tem como avaliar – a aparência externa é de crucial importância para a comercialização e aceitabilidade do produto. E a nutrição mineral está bastante relacionada com estas características. Alguns exemplos dos mais comuns serão, a seguir, apresentados.

A “podridão apical” ou “fundo preto”, lesão que ocorre no fruto de tomate durante o período de crescimento e que hoje leva a grandes perdas de produção, é um dos problemas mais comuns nesta cultura. Hoje, sabe-se que esta anomalia trata-se de deficiência do elemento no meio ou induzida por outros fatores como a umidade do solo, disponibilidade elevada de N, K, Mg e Na, uso de fontes de  $N-NH_4^+$  (amoniaco), intensidade de transpiração foliar, cultivar, dentre outras. A Tabela 5.9. mostra a importância da quantidade e do equilíbrio nas adubações nitrogenada e potássica, no controle da anomalia em tomateiro variedade Santa Clara (Grupo Santa Cruz). Neste trabalho, a maior produção foi obtida com doses de N variando de 200 a 400 kg/ha e de  $K_2O$  em 300 kg/ha: onde o aparecimento da podridão apical foi nula ou bastante baixa.

**TABELA 5.9 Efeito de doses de nitrogênio e de potássio na incidência da podridão apical em frutos de tomate (% dos frutos com lesão)**

N (kg/há)	K <sub>2</sub> O (kg / ha)			
	150	300	600	1200
100	0,0	0,0	0,0	12,0
200	0,0	0,0	0,0	13,6
400	4,7	6,8	13,1	17,4
800	11,3	10,7	24,7	35,6

DMS (Tukey 5%)

Fonte: SILVA et al. (1993).

Como visto no capítulo 3, o N é o nutriente mais exigido pelas culturas, portanto, é aplicado em doses elevadas. E isso, tem trazido preocupações sob dois aspectos: o primeiro, pela contaminação de águas subterrâneas e dos mananciais e, a segunda, pela elevação dos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (nitrato) nos alimentos, principalmente naqueles de consumo “in natura” como as hortaliças e as frutas. O NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ingerido com os alimentos, no trato digestivo pode ser reduzido para N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (nitrito), que na corrente sanguínea combina-se com a hemoglobina, formando a forma inativa denominada de metahemoglobina, trazendo problemas de asfixia ao organismo. Também, o N-NO<sub>2</sub> pode levar à produção de nitrosaminas, as quais são cancerígenas e mutagênicas. Muitos fatores levam ao acúmulo de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos vegetais citando-se o nível de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no meio de cultivo, a baixa intensidade luminosa, hora de colheita do produto, deficiência de molibdênio, etc. Em vegetais, particularmente em espinafre, um conteúdo de 2 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/g de matéria seca é considerado como um nível crítico; em forrageiras, conteúdos abaixo de 4 mg N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> /g matéria seca são aceitáveis (MENGEL & KIRKBY, 1987). A Tabela 5.10. mostra os efeitos das relações NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na solução nutritiva e das estratégias de manejo sobre a produção e teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nas folhas de alface cultivadas em meio hidropônico (FAQUIN et al. 1993). As estratégias de omissão do N ou sua substituição pelo cloro na solução, reduziram o N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nas folhas, mais depreciaram a produção e a qualidade (aparência) do produto. Por outro lado, a produção e a qualidade (aparência) foram superiores nos tratamentos com maior proporção de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na solução; porém com uma qualidade biológica inferior, visto à maior concentração de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nas folhas o que é indesejável. Uma estratégia prática importante, seria a colheita das plantas à tarde, a qual promoveu uma diminuição, em torno de 1% nos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos melhores tratamentos (Tabela 5.10.).

Um outro exemplo para hortaliças é o chamado superbrotamento do alho, que se caracteriza pela presença de brotações laterais do bulbo durante os estágios de crescimento, o que deprecia a qualidade comercial do produto. Esta anormalidade tem sido atribuída à doses elevadas e manejo inadequado da adubação nitrogenada na cultura. A Figura 5.2. mostra que a percentagem de bulbos superbrotados aumenta linearmente com as doses de N aplicadas.

**TABELA 5.10** Efeito das relações  $N-NO_3^- : NH_4^+$  na solução nutritiva e de estratégias de manejo, sobre o peso fresco da parte aérea de  $N-NO_3^-$  nas folhas de alface

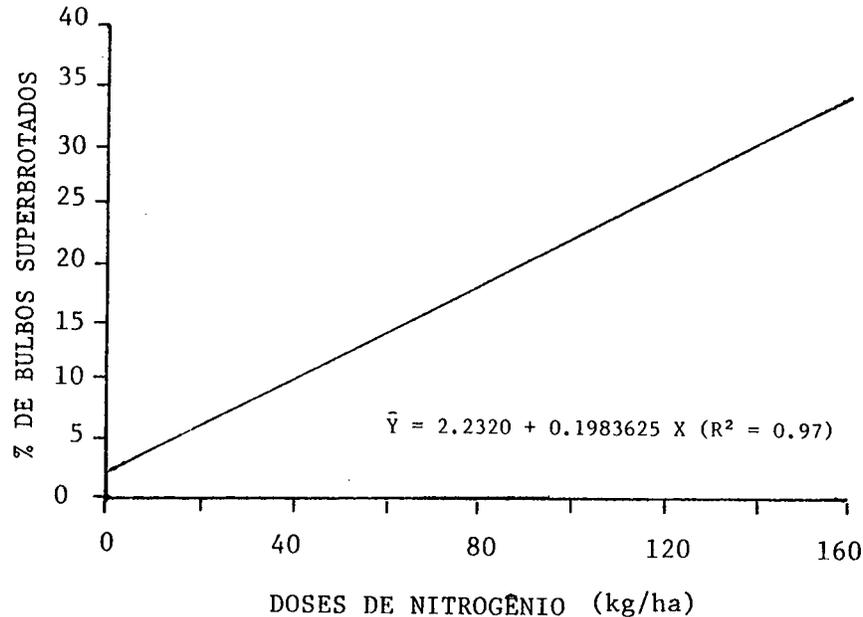
Relação $N-NO_3^- : NH_4^+$	Estratégias de manejo <sup>(1)</sup>			
	6:00 + N	16:00 h + N	6:00 h – N + Cl	6:00 h – N
<b>Matéria fresca da parte aérea (g/ pl.)</b>				
100:00	300,0 a A <sup>(2)</sup>	302,5 a A	190,0 a B	152,5 ab B
85:15	247,5 a A	250,0 a A	202,5 a AB	187,5 a B
70:30	127,5 b A	123,3 b A	107,5 b A	97,5 bc A
55:45	100,0 b A	97,5 b A	85,0 b A	80,0 c A
40:60	115,0 b A	100,0 b A	102,0 b A	85,0 bc A
<b>Teores de <math>N-NO_3^-</math> nas folhas (%)</b>				
100:00	2,77 a A	1,70 a B	0,50 a C	1,62 a B
85:15	2,58 a A	1,37 ab B	0,54 a C	1,37 ab B
70:30	1,11 b A	0,77 bc A	0,70 a A	0,64 c A
55:45	0,85 b A	0,69 c A	0,58 a A	0,78 bc A
40:60	0,82 b A	0,46 c A	0,87 a A	0,69 c A

(1) Estratégias: colheita das plantas às 6:00 e 16:00 h na presença de N (+N) na solução; omissão do N (-N) na solução ou substituição pelo Cl (-N + Cl) uma semana antes da colheita.

(2) Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si (Tukey 5%)

Fonte: FAQUIN et al. (1993)

A deficiência de B promovendo o lóculo aberto no tomate e o coração preto no repolho, também são bastante conhecidos. A deficiência de boro também aumenta a taxa de chochamento do alho e reduz a sua capacidade de armazenamento.



**FIGURA 5.2** Efeito de doses de nitrogênio no superbrotamento de bulbos de alho. (RESENDE, 1992).

Alguns compostos voláteis contendo enxofre contribuem para o odor e sabor característico que se desprende de algumas hortaliças como o alho, a cebola, a mostarda, etc. O óleo de alho tem como principais componentes o alil-bissulfito e alil-propil-bissulfito, portanto, compostos contendo enxofre e que compõem a qualidade do produto.

Como visto na Tabela 5.1., as hortaliças são importantes fontes de vitaminas e sais minerais para a alimentação humana, os quais são influenciados pela nutrição mineral. Poucas são as informações encontradas na literatura a respeito do assunto. MULLER & HIPPE (1987) verificaram que os efeitos dos nutrientes nos teores de vitaminas podem apresentar intensidades bem distintas, dependendo da espécie. Em alface, ao se alterar o fornecimento de N de 0,75 para 1,5 g/planta, houve um aumento de 62% no teor de vitamina C, enquanto que em espinafre europeu o incremento foi de apenas 15%. Já em couve-flor, no mesmo caso, constataram uma redução de 14% no teor desta vitamina. Verificaram também, que o potássio estimulou a produção de vitamina C nas duas últimas espécies, ocorrendo o contrário com a alface.

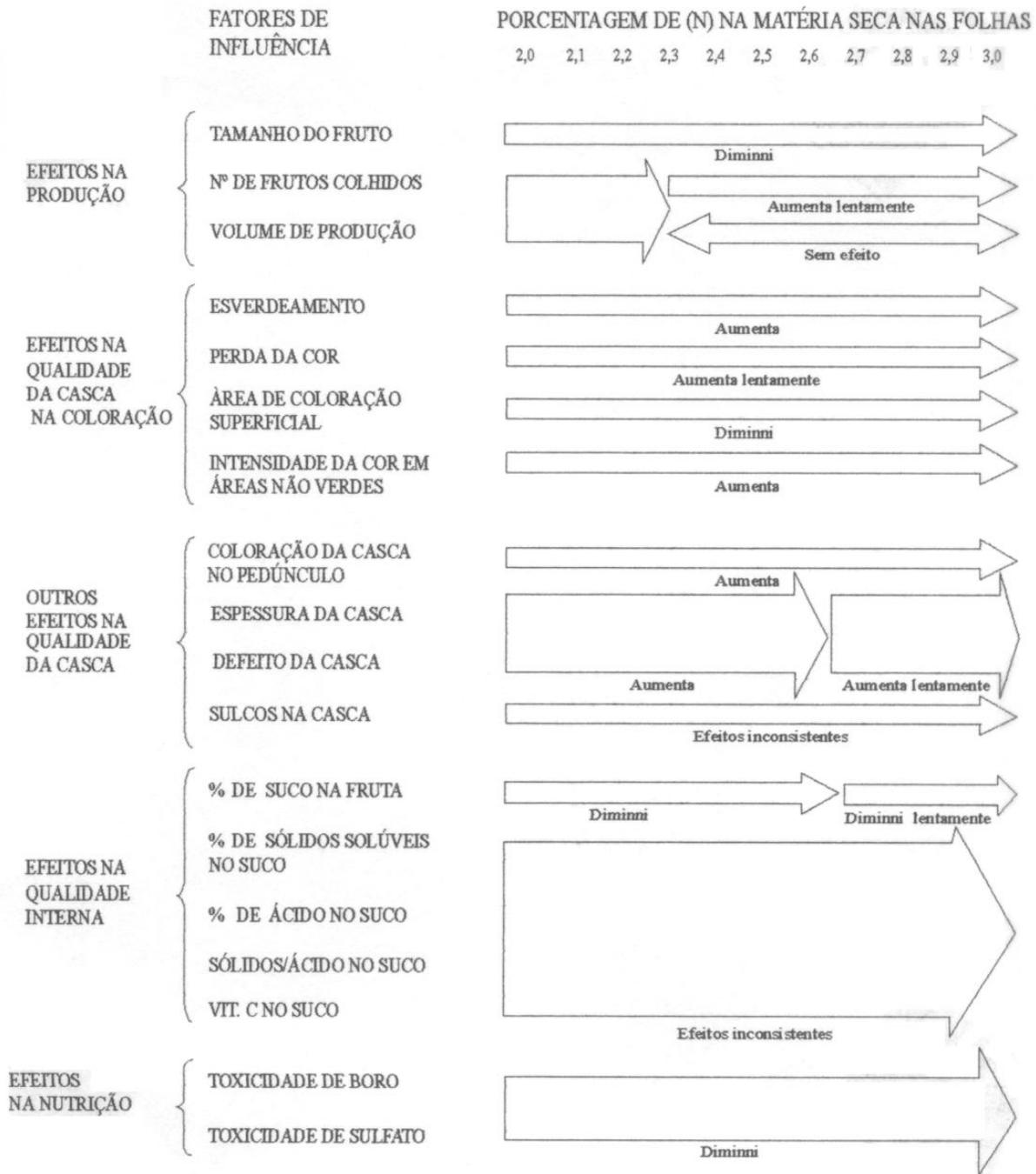
Principalmente para hortaliças e frutos, as características visuais são de extrema importância na comercialização dos produtos. Na Tabela 5.11. são apresentadas algumas características visuais desejáveis no comércio de São Paulo (Cooperativa Agrícola de Cotia, citado por HAAG, 1992).

**TABELA 5.11 Características mais desejáveis para alguns produtos no comércio em São Paulo**

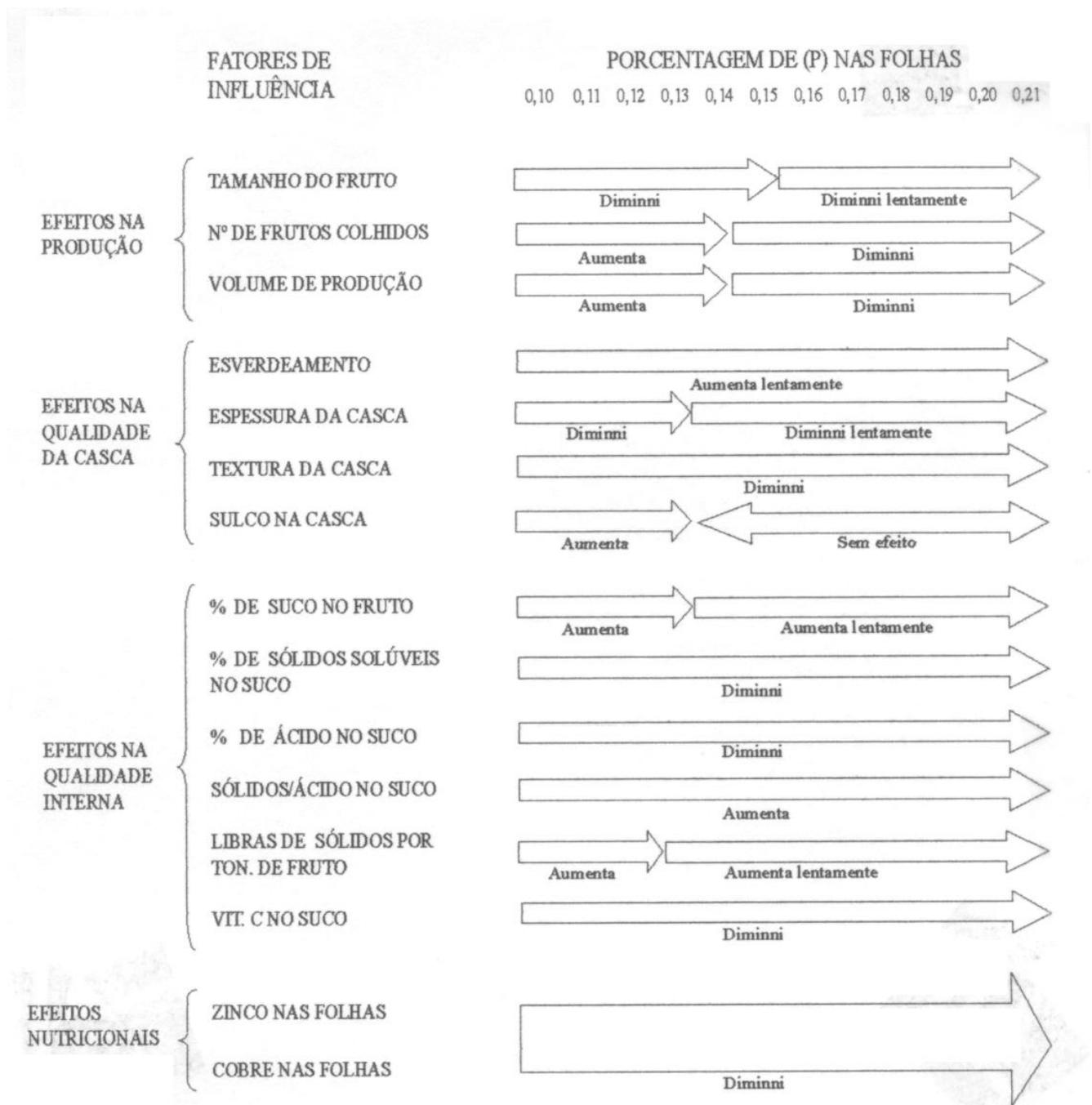
Espécies	Diâmetro	Comprimento	Peso (g)	Coloração
	-----	cm		
Alface	15,0 – 17,0	10	400	verde-clara
Beringela	7 – 8	14 – 16	200 – 250	roxo-escuro
Cenoura	3 – 3,5	16-20	100 – 150	Vermelha
Couve-flor	22 – 25	20	3.000	Branca
Pepino	4,5 – 5	20 – 23	350 – 400	Verde
Pimentão	6 – 7	12 – 14	180 – 200	Verde
Jiló	5	5	8	Verde

Fonte: HAAG (1992).

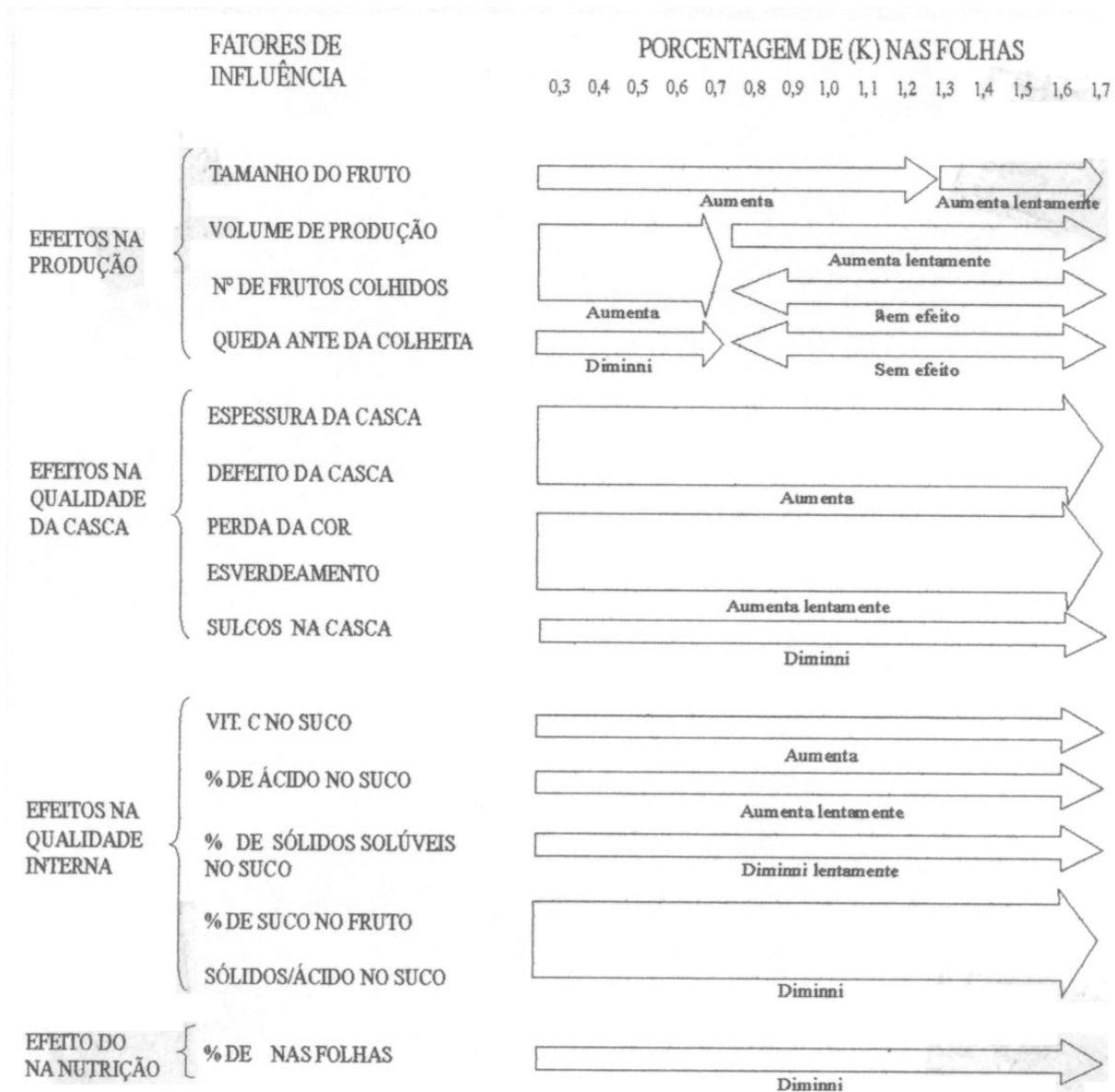
Dentre as frutíferas, a cultura dos citros certamente foi a mais pesquisada no que se refere à relação entre a nutrição e qualidade. HAAG (1992) usou uma representação interessante relacionando os teores foliares de N, P e K com a produção e qualidades externas e internas dos citros, que são reproduzidas nas Figuras 5.3., 5.4. e 5.5., respectivamente.



**FIGURA 5.3** Influência do N% nas folhas de citrus sobre as qualidades do fruto (HAAG, 1992).



**FIGURA 5.4** Influência do P% nas folhas de citrus sobre as qualidades do fruto (HAAG, 1992).



**FIGURA 5.5** Influência do K% nas folhas de citrus sobre as qualidades do fruto (HAAG, 1992)

Com relação ao N (Figura 5.3.) o tamanho e o número de frutos e o volume de produção aumentam com a elevação dos teores do elemento nas folhas e a queda de frutos diminui. O esverdeamento, um efeito visual não desejado nos frutos, aumenta com o acréscimo de N% nas folhas. Com relação à qualidade interna, observa-se que a percentagem de suco nos frutos diminui à medida que cresce o teor de N nas folhas. A percentagem de sólidos solúveis, percentagem de ácido no suco, a relação sólidos/ácidos no suco e a concentração de vitamina C são pouco influenciados pela concentração de N nas folhas.

Com relação ao P (Figura 5.4.) o tamanho dos frutos diminui e a produção aumenta dentro de limites, com o aumento dos níveis de P% nas folhas. As qualidades internas são mais influenciadas pelo P nas folhas. A percentagem de suco no fruto, sólido/ácido no suco aumentaram com os teores de P, enquanto que a percentagem de `sólidos solúveis´ e vitamina C no suco diminuem.

O aumento do K% nas folhas aumenta o tamanho, a produção e o número de frutos (Figura 5.5.). No mesmo sentido aumenta o teor de vitamina C e a percentagem de ácido no suco; e diminui a concentração de sólidos solúveis, percentagem de suco e sólidos/ácido no fruto.

Para os outros nutrientes, um menor volume de estudos são encontrados na literatura, mostrando o efeito dos mesmos sobre a qualidade dos citros. É citado que a deficiência de Mg pode resultar na produção de frutos relativamente menores e com menor teor de acidez e vitamina C. Encontram-se afirmações que a deficiência aguda de Mn pode resultar em redução da produção e na intensidade de coloração dos frutos enquanto que a sua aplicação promove um aumento no teor de sólidos solúveis no suco. Para a deficiência de B em citros, relatam-se que os frutos apresentam tamanho reduzido, mal formados e com exsudação de goma; no albedo e no centro podem aparecer manchas escuras descritas como bolsas de goma. A percentagem de suco é reduzida e a queda de frutos também é intensa sob condições de deficiência de B. Para pomares cítricos deficientes em cobre os frutos produzidos tendem a ser menores e a casca apresenta-se endurecida e com bolsas de goma. Os teores de sólidos solúveis, acidez e vitamina C tendem a ser significativamente inferiores.

### 5.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Voltando-se ao item 1.4. deste volume, após a definição de adubação, a qual envolve o conceito de qualidade dos produtos agrícolas, depara-se com um parágrafo que diz (MALAVOLTA, 1987): qualquer que seja a cultura, quaisquer que sejam as condições de solo e de clima, na prática da adubação procura-se responder às perguntas: (1) o que?; (2) quanto?; (3) quando?; (4) como?; (5) pagará?; (6) efeito na qualidade do produto?; e, (7) efeito na qualidade do ambiente.

De maneira geral, a grande prioridade nos programas de pesquisas no Brasil tem sido dada ao aumento da produtividade das culturas, visando atingir um volume de produção capaz de atender à demanda interna e criar excelentes para gerar através das exportações e proporcionar lucros ao agricultor. Ou seja, os programas de pesquisas têm sido propostos com objetivos voltados para responder às cinco perguntas iniciais. Portanto, pesquisas visando responder às duas últimas perguntas – efeitos na qualidade do produto e do meio ambiente – têm sido relegadas à segundo plano. Apesar da importância da adubação das culturas quanto aos seus efeitos na produtividade, pouco estudos têm sido realizados sobre sua influência na qualidade do produto.

---

Sabe-se que o fator mais importante e maior para o aumento da produtividade é, certamente, o uso racional de corretivos agrícolas e fertilizantes, que associados a outros fatores de produção como sementes melhoradas, irrigação, controle de pragas e doenças, práticas culturais, criam condições favoráveis para atingir-se o objetivo final.

A estrutura da produção agropecuária no Brasil é tal que os produtos energéticos e/ou exportáveis, são produzidos pelas grandes propriedades agrícolas com características empresariais, tais como elevado capital de giro, maior acesso ao crédito e aos insumos modernos, dentre eles os corretivos e fertilizantes. Estes fatos, associados ao grande interesse governamental na produção de energia renovável (álcool) e promover a exportação de produtos da agricultura e da agroindústria, produzem uma defasagem muito grande entre o setor da agricultura e da pecuária responsável pela produção de alimentos para o mercado interno e a agricultura empresarial voltada para os produtos de exportação

Dados oficiais evidenciam uma elevada participação de pequenos produtores na produção de alimentos tais como o arroz, feijão, milho e mandioca, que é a base da alimentação do brasileiro. Como a adubação e a nutrição mineral estão intimamente envolvidas com a qualidade interna e externa dos produtos agrícolas, certamente, os pequenos agricultores, que praticam uma agricultura de subsistência e de baixos insumos, produzem (e a população consome) produtos também de baixa qualidade nutricional e de baixa competitividade comercial, num mundo consumidor cada vez mais exigente.

Por todos estes aspectos, é importante que a influência da adubação na qualidade dos produtos agrícolas, seja avaliada dentro de um programa sistemático de pesquisa planejado, envolvendo esforços das diversas áreas do conhecimento como nutricionistas, melhoristas e especialistas em nutrição mineral, inclusive acompanhado de uma avaliação econômica, de tal forma que as iniciativas não dependam apenas da dedicação de pesquisadores isolados.

---

## LITERATURA CITADA

---

ARF, O. Importância da adubação na qualidade do feijão. **In:** SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DE PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1, Ilha Solteira, 1989. **Anais**, Ilha Solteira, FEIS/UNESP/ANDA/POTAFOS, 1989. 31 p.

BARBOSA FILHO, M.P. & FONSECA, J.R. Importância da adubação na qualidade do arroz. **In:** SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1, Ilha Solteira, 1989. **Anais**, Ilha Solteira, FEIS/UNESP/ANDA/POTAFOS, 1989. 20 p.

BATAGLIA, O.C. & MASCARENHAS, H.A.A. Absorção de nutrientes pela soja. Campinas, Instituto agrônomo de Campinas, 1977. 36p. (Bol. Técnico, 41).

BATAGLIA, O.C.; DECHEN, A.R. & SANTOS, W.R. Diagnose visual e análise de plantas. **In:** REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, Piracicaba, 1992. **Anais**, Piracicaba, SBCS/Fundação Cargill, 1992. P.369-393.

BERTON, R.S. Fertilizantes e poluição. **In:** REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, Piracicaba, 1992. **Anais**, Piracicaba, SBCS/Fundação Cargill, 1992. P.299-313.

BIELESKI, R.L. & FERGUSON, I.B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. **In:** LAUCHLI, A. & BIELESKI, R.L. **Encyclopedia of Plant physiology** : Inorganic Plant Nutrition. Berlin, Springer-Verlag 1983. **15A** :422-449.

BOLLARD, E.G. Involvement of unusual elements in plant growth and nutrition. **In:** LAUCHLI, A. & BIELESKI, R.L. (ed.) **Encyclopedia of Plant Physiology** : New series. Spring Verlag: Berlin. 1983. Vol. **15B** : 695-755.

BROWN, P.H.; WELSH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. **Plant physiol.**, Rockville, **85**:801-803, 1987.

BROYER, T.C.; CARLTON, A.B.; JOHNSON, C.M. & STOUT, P.R. Chlorine: a micronutrient element for higher plants. **Plant Physiol.**, Lancaster, **29**:526-532, 1954.

CAMARGO, P.N. & SILVA, O. **Manual de adubação foliar**. São Paulo, Ed. E Distribuidora Herba Ltda, 1975. 285p.

CANAL, I.C. & MIELNICZUK, J. Parâmetros de absorção de potássio em milho (*Zea mays*, L.), afetados pela interação alumínio-cálcio. **Ciência e Cultura**, São Paulo, **35**:336-340, 1983.

CASTELLANE, P.D. Nutrição mineral e qualidade de leguminosas folhosas. **In:** SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1, Ilha Solteira, 1989. **Anais**, Ilha Solteira, FEIS/UNESP/ANDA/POTAFOS, 1989. 18p.

---

CASTELLS, A. Absorção de fósforo e de cálcio como critério de seleção de genótipos de soja (*glycine max* (L) Merrill) quanto à tolerância ao alumínio. Viçosa, UFV, 1984. 62p. (Dissertação de Mestrado).

CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between concentration and flux into roots of intact plants. *Plant Physiol.*, Lancaster, **54**:564-568, 1974.

CLARKSON, D.T. Adaptações morfológicas e fisiológicas das plantas a ambientes de baixa fertilidade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16. Ilhéus. 1985. Anais. Ilhéus, CEPLAC/BCS, 1985. p. 45-75.

CRESS, W.A.; THRONEBERRY, G.O. & LINDSEY, D.L. Kinetics of phosphorus absorption by mycorrhizal and non-mycorrhizal tomato roots. *Plant Physiol.*, Lancaster, **64**:484-487, 1979.

CROCOMO, O.J. Assimilação do nitrogênio pelas plantas, In: FERRI, M.G. (Coord). **Fisiologia Vegetal** 1. São Paulo, Editora da Univ. de São Paulo, 1979, p.179-207.

CURI, N. & FRANZMEIER, D.P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. *Soil Sci. Soc. of Amer. Journal*, Madison, **51**(1):153-158, 1987.

EPSTEIN, E. & HAGEN, C.E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. *Plant Physiol.*, Lancaster, **27**:457-474, 1952.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. São Paulo / Rio de Janeiro, Ed. da Universidade de São Paulo e Livros Tec. e Cient. Editora, 1975. 34p.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & NORVELL, W.A. Nickel in higher plants: further evidence for an essential role. *Plant Physiol.*, Lancaster, **76**:691-693, 1984.

FAQUIN, V.; Cinética da absorção de fosfato, nutrição mineral, crescimento e produção da soja sob influência de micorriza vesículo-arbuscular (MVA). Piracicaba, ESALQ-USP, 1988. 136p. (Tese de Doutorado).

FAQUIN, V.; MALAVOLTA, E. & MURAOKA, T. Cinética da absorção de fosfato em soja sob influência de micorriza vesículo a arbuscular. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, **14**(1):41-48. 1990.

FAQUIN, V. & VALE, F.R. Toxidez de alumínio e de manganês. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, **13**(170):28-38. 1991.

FAQUIN, V.; SANTOS, H.S.; MARQUES, E.S.; SILVA, E.B.; ANJOS, I.A. & RODRIGUES, M.G.V. Crescimento e concentração de nitrato em alface sob influência da relação  $\text{NO}_3^- : \text{NH}_4^+$  e cloro na solução nutritiva Lavras, DCS/ESAL, 1993, 45 p. (Relatório Técnico / Científico da Disciplina Nutrição Mineral de Plantas do CPGSNP / ESAL).

FERNANDES, C.G.P. Formulação de adubo foliar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ADUBAÇÃO FOLIAR, 2, Botucatu, 1987. **Anais**, Botucatu, Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1987. P.539-547.

GARCIA, A.W.R. & SALGADO, A.R. Absorção do zinco pelo cafeeiro através de sais e misturas quelatizadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 9, São Lourenço, 1981. **Resumos**, São Lourenço, MIC/IBC, 1981. P.39-47.

GUAZZELLI, E.M.F.M. Efeito de nitrato e amônio no crescimento, assimilação e eficiência de utilização do nitrogênio por cultivares de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) na fase inicial de crescimento. Lavras, ESAL, 1988. 112 p. (dissertação de Mestrado).

HAAG, H.P. Nutrição mineral e qualidade de produtos agrícolas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20 Piracicaba, 1992. **Anais**, Piracicaba, SBCS/Fundação Cargill, 1992. P.405-425.

HEWITT, E.J. & SMITH, T.A. Plant mineral nutrition. London, English University Press, 1975, 298p.

HODGES, T.K. Ion absorption by plant roots. **Adv. Agron**, New York, **25**:163-207, 1973.

HOFSTEE, B.H.J. 1952. On the evaluation of constant  $V_m$  and  $K_m$  in enzyme reaction. **Science**, Washington. **116**:329-333, 1952.

KARUNARATNE, R.S.; BAKER, J.H. & BARKER, A.V. Phosphorus uptake by mycorrhizal and non-mycorrhizal roots of soybeans. **J. Plant Nutr.**, New York, **9**:1303-1313, 1986.

LINEWEAVER, H. & BURK, D. The determination of enzyme dissociation constants **J. Amer. Chem. Soc.**, Easton, **56**:658-666, 1934.

MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola**: nutrição de plantas e fertilidade do solo. São Paulo, Ceres, 1976. 528p.

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

MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola**: Adubos e Adubação. São Paulo, Ceres, 1981. 596p.

MALAVOLTA, E & CROCOMO, O.J. O potássio e a planta. In: POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. **Anais**, Piracicaba, Inst. Da Potassa e Fosfato: Inst. Internacional da Potassa, 1982. P.95-162.

MALAVOLTA, E. **Manual de calagem e adubação das principais culturas**. São Paulo, Ceres, 1987.496p.

MALAVOLTA, E. Função dos nutrientes na planta e qualidade dos produtos agrícolas. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1, Ilha Solteira, 1989. **Anais**, Ilha Solteira, FEIS/UNESP/ANDA/POTAFOS, 1989. 42p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas**. Piracicaba, POTAFOS, 1989. 201p.

---

- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London, Academic Press Inc., 1986. 674p.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Bern, Intern. Potash Institute, 1987. 687p.
- MITCHELL, P. Chemiosmotic coupling in oxidative and photosynthetic phosphorylation. **Biological Review**, Prague, **41**:445-502, 1966.
- MULLER, K. & HIPPE, J. Influence of differences in nutrition on important quality characteristics of some agricultural crops. **Plant and Soil**, The Hague, **100**:35-45, 1987.
- PRETTY, K.M. O potássio e a qualidade da produção agrícola. In: POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. **Anais**. Piracicaba, Inst. da Potassa e Fosfato: Inst. Internacional da Potassa, 1982. p. 177-194.
- RESENDE, G.M.D. **Influência do nitrogênio e paciobutrazol na cultura do alho (*Allium sativum* L.) cv. Quitéria**. Lavras, ESAL, 1992 (Dissertação de Mestrado).
- ROSOLEM, C.A. & BOARETTO, A.E. (Edit). **Anais do 2º Simpósio Brasileiro de Adubação Foliar**. Botucatu: FEPAF/UNESP, 1987. 575p.
- RUIZ, H. Estimativa dos parâmetros cinéticos  $k_m$  e  $V_{max}$  por uma aproximação gráfico-matemática. **Rev. Ceres**, Viçosa, **32**:79-84, 1985.
- RUIZ, H.A. & FERNANDES FILHO, E.I. Cinética: software para estimar as constantes  $V_{max}$  e  $K_m$  da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, Piracicaba, 1992. **Anais**, Piracicaba, SBCS, 1992. p. 124-125.
- SGARBIERI, V.C. **Alimentação e Nutrição**: fator de saúde e desenvolvimento. Campinas, Editora da UNICAMP, 1987. 387p.
- SILVA, E.C.; ALVARENGA, M.A.R. & CARVALHO, J.G. Influência de níveis de N e  $K_2O$  na produção e incidência de podridão apical em frutos de tomateiro podado e adensado. In: CONGRESSO DA PÓS-GRADUAÇÃO NA ESAL, 6, Lavras, 1993. **Anais**, Lavras, APG/CPG/ESAL, 1993. P.147-148.
- SILVA, O. Uso adequado da adubação foliar. **A Granja**, Porto Alegre, **37**(398):53-57, 1981.
- SILVEIRA, A.P.D. Cinética da absorção de fósforo e estado nutricional do feijoeiro sob influência de micorriza vesículo-arbuscular. Piracicaba, ESALQ-USP, 1990. 130p. (Tese de Doutorado).
- SIQUEIRA, J.O. & FRANCO, A.A. **Biologia do Solo**: fundamentos e perspectivas. Lavras, ME/ESAL/FAEPE/ABEAS, 1988. 235p.
- SIQUEIRA, J.O. **Biologia do Solo**. Lavras, ESAL/FAEPE, 1993. 230p.
- TAKAHASHI, E. & MIYAKE, Y. Silica and plant growth. In: Proc. Intern. Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture. Toquio, Nippon Dojohiryō Gakkai, 1977. p.603-611.
-

TANAKA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; MIRANDA, M.A.C. Effect of liming on soybean protein and oil yield. **Better Crops Intern.**, 7(2):9, 1991.

UNDERWOOD, E.J. **Trace elements in human and animal nutrition**. 4<sup>a</sup> ed. New York, Academic Press. 1977.545p.

VASCONCELOS, C.A. Importância da adubação na qualidade do milho e sorgo. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO E QUALIDADE DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS, 1, Ilha Solteira, 1989. **Anais**, Ilha Solteira, FEIS/UNESP/ANDA/POTAFOS, 1989. 20p.

VILELA, L. & ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio-fósforo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 8:91-96, 1984.

VOLKWEISS, S.J. Otimização das características da planta para maximizar a eficiência do adubo. In: **Seminário fósforo, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes: situação atual e perspectivas na agricultura**, São Paulo, 1984. **Anais**, São Paulo, Manah SA, 1986. 144p.

WILKINSON, G.N. Statistical Estimation in Enzyme Kinetics. **Biochen. J.**, London, 80:324-332, 1961.

---

# CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO “LATO SENSU”

## PRÉ-TESTE

Marque “V” se a afirmativa for verdadeira e “F” se for falsa

### Capítulo 1

- 01. A planta é formada por elementos químicos obtidos de três meios: ar, água e solo.
- 02. Os elementos químicos minerais essenciais às plantas são denominados macroelementos e microelementos.
- 03. Os macronutrientes são: N, P, K, Ca, Mg e B e os micronutrientes são S, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn.
- 04. Há uma relação bastante íntima entre Nutrição Mineral de Plantas, Fertilidade.

### Capítulo 2

- 05. Define-se absorção iônica, o processo pelo qual o elemento M passa do órgão de absorção para outro qualquer, como ex., da raiz para a parte aérea.
  - 06. Para serem absorvidos, os nutrientes presentes no solo devem entrar em contato com as raízes das plantas, e o fazem pelos processos da “intercepção radicular”, “fluxo de massa” e “difusão”.
  - 07. Dois são os mecanismos de absorção iônica: o “passivo”, que corresponde a ocupação do simplasto e o “ativo”, que se trata da ocupação do apoplasto.
  - 08. A absorção ativa apresenta as seguintes características: é um processo lento e irreversível, contra gradiente de concentração e exige energia metabólica.
  - 09. O  $V_{max}$  é a quantidade de M absorvida quando todas as moléculas do carregador estiverem “ocupadas” transportando íons.
  - 10. O  $K_m$  é a concentração do nutriente na solução que garante metade da  $V_{max}$  e é uma medida da afinidade do elemento pelo carregador.
  - 11. Na “inibição competitiva” entre os íons na absorção iônica, os elementos competem pelo mesmo sítio do carregador e, neste caso, o efeito do inibidor (I) é anulado pela elevação da concentração do M.
  - 12. O efeito benéfico da micorriza na absorção iônica é conferido pelo aumento da superfície de absorção e maior volume do solo explorado pelo sistema radicular das plantas.
  - 13. O interesse prático da adubação foliar, dentre outros, está em corrigir ou prevenir eventuais deficiências nutricionais e no fornecimento de micronutrientes, principalmente em culturas perenes.
  - 14. A cutícula foliar recobre inclusive a câmara sub-estomática, portanto, a absorção foliar é obrigatoriamente cuticular.
-

- 15. Por serem imóveis (não redistribuídos), as plantas exigem um suprimento constante de B e Ca, o que é feito mais eficientemente quando aplicados via foliar.

### Capítulo 3

- 16. “Exigência Nutricional” refere-se às quantidades de nutrientes que a planta necessita e retira do meio para crescer e produzir bem.
- 17. “Exportação de nutrientes” refere-se às quantidades de nutrientes que são removidas da área pela colheita.
- 18. As funções que um nutriente pode exercer na planta pode ser estrutural, constituinte de enzimas ou ativador enzimático.
- 19. A atmosfera é a principal fonte natural de N para a biosfera, onde se encontra em forma gasosa ( $N_2$ ), diretamente aproveitado pelas plantas.
- 20. A redutase do nitrato ( $RNO_3^-$ ) é o complexo enzimático responsável pela redução do  $N_2$  a  $NH_3$  no processo de fixação biológica do N.
- 21. A principal forma de N absorvida pelas plantas é o  $NO_3^-$  e nesta forma o mesmo é assimilado (incorporado a compostos orgânicos).
- 22. A principal função do N na planta é a ativação enzimática.
- 23. A principal função do P na planta é a ativação enzimática.
- 24. A principal função do K na planta é como componente de compostos orgânicos, portanto, desempenha uma importante função estrutural.
- 25. O Ca é facilmente redistribuído na planta e, por isso, os sintomas de deficiência ocorrem primeiro nas folhas mais velhas.
- 26. O Mg é componente da clorofila.
- 27. O B, tal como o Ca, é imóvel na planta, portanto, os sintomas de deficiência ocorrem nas folhas novas e nos meristemas apicais.
- 28. No campo, os principais problemas de deficiência de micronutrientes nos solos das regiões tropicais referem-se ao B e ao Zn.
- 29. O molibdênio (Mo) é o nutriente menos exigido pelas plantas.

### Capítulo 4

- 30. Os elementos úteis não são essenciais à vida das plantas.
- 31. Um elemento essencial à planta é potencialmente tóxico, depende da sua concentração no meio.
- 32. O silício (Si) e o sódio (Na) são os principais elementos úteis às plantas.
- 33. Em condições naturais, o alumínio (Al) é o principal elemento tóxico às plantas.
- 34. O principal sintoma de toxidez de Al manifesta-se na parte aérea das plantas.

### Capítulo 5

- 35. A qualidade de um produto agrícola pode ser entendida como a aparência (tamanho, cor), qualidade biológica (teores de proteína, carboidratos, gorduras, vitaminas, minerais) e sabor.
-

36. A produção de produtos de melhor qualidade é importante devido: consumidor cada vez mais exigente; processamento industrial; competitividade de mercado; atendimento das normas internacionais de qualidade.

### Gabarito Pré-Teste

01. V	13. V	25. F
02. F	14. V	26. V
03. F	15. F	27. V
04. V	16. V	28. V
05. F	17. V	29. V
06. V	18. V	30. V
07. F	19. F	31. V
08. V	20. F	32. V
09. V	21. F	33. V
10. V	22. F	34. F
11. V	23. F	35. V
12. V	24. F	36. V

# CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO “LATO SENSU”

## PÓS-TESTE

Marque “V” se a afirmativa for verdadeira e “F” se for falsa

### Capítulo 1

- 01. As plantas obtêm seus nutrientes minerais do ar e da água.
- 02. Para ser considerado essencial às plantas, um determinado elemento químico deve atender aos critérios direto e, ou, indireto de essencialidade.
- 03. Os elementos químicos minerais essenciais às plantas, são divididos em macronutrientes e micronutrientes por aspectos puramente qualitativos.
- 04. Na nutrição mineral das plantas, os macronutrientes são mais importantes que os micronutrientes.
- 05. O cobalto (Co) é considerado essencial somente às leguminosas que dependem da fixação biológica do nitrogênio atmosférico para viver.
- 06. A adubação visa cobrir a diferença entre a exigência da planta e o fornecimento de nutrientes pelo solo, e as doses adequadas são estabelecidas em estudos que relacionam a Fertilidade do Solo, Nutrição de Plantas e Adubação.

### Capítulo 2

- 07. A redistribuição de um nutriente M na planta pode ser entendida como a sua transferência das folhas para os frutos.
  - 08. O fluxo de massa é o principal processo que permite o contato do P e do K do solo com a raiz.
  - 09. O conhecimento dos processos que permitem o contato íon-raiz é importante, principalmente, no que se refere à localização do adubo em relação à semente ou à raiz da planta.
  - 10. Na “absorção ativa”, o nutriente M deve vencer a barreira das membranas celulares, o processo é mediado por um carregador e exige energia na forma de ATP.
  - 11. A absorção de íons pelas raízes em função das suas concentrações no meio, segue a equação de Michaelis-Menten.
  - 12. O  $V_{max}$  e o  $K_m$  são os parâmetros cinéticos de absorção e características da própria planta, que conferem à mesma maior ou menor capacidade de absorção.
  - 13. Do ponto de vista prático, interessam espécies que apresentam  $V_{max}$ ,  $K_m$  e  $C_{min}$  altos, pois as mesmas, em princípio, teriam capacidade de absorver nutrientes em baixos níveis no solo.
-

- 14. Entende-se como sinergismo na absorção iônica, quando a presença de um elemento inibe a absorção do outro.
- 15. De acordo com a Figura 2.16 (página 44), a calagem para elevar o pH para 6 – 6,5, aumenta a disponibilidade e a absorção do Mo, P, N, S e diminui a do Fe, Cu, Mn e elimina a toxidez de Al.
- 16. A micorriza promove uma maior absorção de nutrientes do solo, notadamente o P, que se move no solo por fluxo de massa.
- 17. A adubação foliar noturna é menos eficiente do que a diurna, pois nestas condições há o fechamento dos estômatos e não existe a energia adicional (ATP) fornecida pela fosforilação fotossintética.
- 18. Na adubação foliar, é importante a solução atingir a parte abaxial das folhas, pois nesta face há predominância dos estômatos e presença de cutícula mais fina.
- 19. A adubação foliar com Ca e B é pouco eficiente pois ambos são imóveis no floema e a translocação de ambos das folhas para outros órgãos é insignificante.
- 20. A adubação foliar com Ca e B é recomendada apenas como corretiva ou preventiva, especialmente para algumas culturas cuja deficiência promove danos aos frutos.
- 21. O N, P, K e Ca são considerados nutrientes móveis (redistribuídos) na planta e o B e Mg imóveis.
- 22. O conhecimento da redistribuição dos nutrientes nas plantas é importante, pois esta reflete na localização dos sintomas visuais da deficiência.
- 23. Os sintomas de deficiência dos nutrientes móveis ocorrem nas folhas novas e gemas apicais e dos imóveis nas folhas velhas das plantas.

### Capítulo 3

- 24. De maneira geral, as exigências nutricionais das plantas seguem a seguinte ordem decrescente: Macronutrientes – N > K > Ca > Mg > P = S e Micronutrientes – Mo > B > Fe > Mn > > Cu > Zn.
  - 25. Os macronutrientes são exigidos pelas plantas em kg/ha e os micronutrientes em g/ha.
  - 26. O N<sub>2</sub> atmosférico só é aproveitado pelas plantas quando transformado para formas combinadas (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) pelos processos de fixação biológica, industrial e atmosférico.
  - 27. A nitrogenase, complexo enzimático responsável pela fixação biológica do nitrogênio no Rizobio, contém Fe e Mo na sua estrutura.
  - 28. O cobalto (Co) é essencial às leguminosas fixadoras de N<sub>2</sub> atmosférico, pois faz parte da nitrogenase.
  - 29. Para ser assimilado (incorporado a compostos orgânicos) o nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) absorvido pelas raízes necessita ser previamente reduzido a amônia (NH<sub>3</sub>).
  - 30. A redução assimilatória do nitrato ocorre em dois estágios: no primeiro o nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) é reduzido a nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) e no segundo o NO<sub>2</sub><sup>-</sup> é reduzido a amônia (NH<sub>3</sub>).
  - 31. As enzimas responsáveis pela redução do nitrato são: no primeiro estágio (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> → NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) a Redutase do Nitrato e no segundo (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> → NH<sub>3</sub>) a Redutase do Nitrito.
  - 32. A Redutase do Nitrato é uma enzima que contém Fe e Co.
  - 33. Os sintomas de deficiência de nitrogênio manifestam-se como uma clorose, inicialmente nas folhas mais novas, por ser o elemento móvel na planta.
-

- 34. As principais funções do P na planta são como componente estrutural de compostos orgânicos (fosfolipídeos das membranas celulares, ácidos nucleicos – DNA e RNA) e de compostos que armazenam e fornecem energia (ATP).
  - 35. As principais funções do K na planta são a ativação enzimática, osmorregulação e transporte de carboidratos.
  - 36. Por ser um elemento imóvel na planta, os sintomas de deficiência de K manifestam-se nas folhas mais novas como uma clorose e necrose das bordas das folhas.
  - 37. O Ca exerce uma importante função na formação da parede celular e na manutenção e funcionamento da parede celular.
  - 38. O Ca é importante no processo reprodutivo vegetal pois é indispensável para a germinação do grão de pólen e para o crescimento do tubo polínico.
  - 39. O Mg é o nutriente que mais ativa enzimas no metabolismo das plantas.
  - 40. Os sintomas de deficiência de Mg e de Mn são semelhantes – clorose internerval – só que a de Mg ocorre primeiro nas folhas mais novas e a de Mn nas mais velhas.
  - 41. Tal como o nitrogênio, o enxofre (S) é absorvido na forma oxidada ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e para ser previamente reduzido a sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ).
  - 42. O enxofre exerce importantes funções na planta como componente de proteínas e como grupo ativo de enzimas.
  - 43. Os sintomas de deficiência de N e de S são semelhantes – clorose generalizada no limbo foliar – só que a de N ocorre primeiro nas folhas mais novas e a de enxofre nas mais velhas.
  - 44. O B é componente de compostos orgânicos na planta, portanto, atende ao critério direto de essencialidade.
  - 45. A principal função do cloro na planta é a sua participação na fotólise da água na fase clara da fotossíntese.
  - 46. A principal função do Cobre e do Ferro na planta é a participação em enzimas que atuam em reações de oxi-redução no metabolismo.
  - 47. O Fe faz parte da clorofila.
  - 48. Tanto o Fe quanto o Mn são pouco móveis na planta, portanto, os sintomas de deficiência de ambos aparecem inicialmente nas folhas mais velhas.
  - 49. Os sintomas de deficiência de Fe manifestam-se como um reticulado fino e o de Mn como um reticulado grosso nas folhas novas.
  - 50. A principal função do Mn na planta é participar como componente de compostos orgânicos.
  - 51. As funções principais do Mo é compor as enzimas Nitrogenase e Redutase do Nitrato.
  - 52. Plantas deficientes em Mo tendem a mostrar deficiência de Nitrogênio.
  - 53. O Mo pode fazer parte da nitrogenase – enzima que fixa o  $\text{N}_2$  no Rizóbio – deve ser sempre considerado na adubação de leguminosas.
  - 54. Os sintomas visuais de deficiência de Zn nas plantas são: encurtamento dos internódios, folhas pequenas e formação de tufos na ponta das ramas das culturas perenes.
  - 55. As principais funções do Zn ligadas aos sintomas de deficiência são o seu envolvimento na atividade da RNase e na síntese do AIA (ácido indolil acético).
  - 56. A essencialidade do cobalto (Co) restringe-se, por enquanto, às plantas que dependem da fixação biológica do N atmosférico.
-

57. A função conhecida do níquel na planta é compor a enzima urease.

#### Capítulo 4

58. O Si é tido como um elemento útil, principalmente à cultura do arroz.
59. Um efeito benéfico atribuído ao Si é o aumento da tolerância das plantas à toxidez de B.
60. O principal sintoma da toxidez de Al aparece nas raízes, as quais tornam-se curtas, engrossadas e adquirem coloração amarronzada.

#### Capítulo 5

61. A adubação e conseqüentemente a nutrição da planta afetam a qualidade dos produtos agrícolas.
62. A influência da nutrição mineral na qualidade dos produtos agrícolas depende da participação dos nutrientes na composição de compostos e no metabolismo da planta.

#### Gabarito Pós-Teste

01. F	17. V	33. F	48. F
02. V	18. V	34. V	49. V
03. F	19. V	35. V	50. F
04. F	20. V	36. F	51. V
05. V	21. F	37. V	52. V
06. V	22. V	38. V	53. V
07. V	23. F	39. V	54. V
08. F	24. F	40. F	55. V
09. V	25. V	41. V	56. V
10. V	26. V	42. V	57. V
11. V	27. V	43. F	58. V
12. V	28. F	44. F	59. F
13. F	29. V	45. V	60. V
14. F	30. V	46. V	61. V
15. V	31. V	47. F	62. V
16. F	32. F		