

## Capítulo 1 INTRODUÇÃO À NUTRIÇÃO DE PLANTAS

### 1.1 Conceitos em nutrição de plantas e a sua relação com as disciplinas afins

O conhecimento atual do conceito de nutrição de plantas é historicamente recente. Resumidamente, serão apresentadas algumas ocorrências ao longo da história da nutrição de plantas. A primeira inferência sobre alguns aspectos da nutrição mineral de plantas teve início na antiguidade quando Aristóteles (384-322 a.C.) filósofo e biólogo grego, já fazia afirmações de como as plantas se alimentavam. Nessa época, afirmava que as plantas são como animais invertidos e mantêm a boca no chão. Para ele, os alimentos seriam previamente digeridos pela terra uma vez que os vegetais não apresentavam excreções visíveis como o fazem os animais.

As investigações a respeito das formas pelas quais as plantas se alimentavam prosseguiram e, a cada fase da história da humanidade, era dado ao conhecimento novas descobertas.

No século XIX, o pesquisador suíço Saussure (1804), fez uma importante publicação, estabelecendo que a planta obtinha C do CO<sub>2</sub> da atmosfera, energia da respiração, hidrogênio e oxigênio eram absorvidos junto com o carbono. Essa publicação estabelecia, ainda, que o aumento da matéria seca da planta era, principalmente, devido ao C, H e O absorvidos e que o solo era o fornecedor de minerais indispensáveis à vida da planta. Nesse mesmo século, Just Von **Liebig** (1803-1873) “pai da nutrição mineral de plantas” estabelecia que os alimentos de todas as plantas verdes são as substâncias inorgânicas ou minerais. Portanto, segundo Epstein (1975), a principal contribuição de Liebig à nutrição de plantas foi a de ter liquidado com a “teoria do húmus” de que a matéria orgânica do solo era a fonte do carbono absorvido pelas plantas. Dessa forma, segundo a teoria de Liebig, a planta vive de ácido carbônico, amoníaco (ácido azótico), água, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido silícico, cal magnésia, potassa (soda) e ferro. Definindo-se, assim, a exigência das plantas aos macronutrientes. E ainda, Liebig contribuiu para o surgimento das indústrias de adubos. No século XX é que se definiu o conceito de micronutrientes, ou seja, aqueles igualmente essenciais, porém exigidos em menores quantidades pelas plantas. No Brasil, nesta época foram criadas as primeiras instituições de ensino e pesquisa (UFBA em 1877; IAC em 1887 e ESALQ em 1901), estabelecendo a base dos estudos em nutrição de plantas, com início na década de 50.

Assim, estudo de nutrição de plantas estabelece **quais são os elementos essenciais para o ciclo de vida da planta, como são absorvidos, translocados e acumulados, suas funções, exigências e os distúrbios que causam quando em quantidades deficientes ou excessivas.**

É pertinente, ressaltar a relação da nutrição de plantas e a agronomia. Deste modo, os objetivos principais da ciência agrônômica, estão voltados para a produção de alimentos, fibras e energia. Para isso, existem mais de cinquenta fatores de produção que devem ser considerados para atingir a máxima eficiência dos sistemas de produção agrícolas. Esses fatores de produção estão arrançados em três grandes sistemas como: solo, planta e ambiente. A área de nutrição de plantas está centrada no sistema planta, assim como outras (fitopatologia, fisiologia vegetal, melhoramento vegetal, fitotecnia, etc.). No solo, estão as áreas de fertilidade do solo, fertilizantes/corretivos, adubação, mecanização, etc. e no ambiente irrigação e drenagem, climatologia, etc. Ressalta-se que a maioria destes fatores de produção pode ser controlado, no campo, pelo produtor; entretanto, alguns são de difícil controle, como a luz e a temperatura.

Especificamente, a nutrição de plantas, tem relação estreita com as disciplinas de fertilidade do solo, fertilizantes/corretivos e a adubação das culturas.  $Adubação = (QP - QS) \div \text{fator } f$ ; QP = Quantidade de nutriente requerida pela planta (exigência nutricional); QS=Quantidade de nutriente contido no solo; f= fator de eficiência de fertilizantes, que pode ser reduzido pelas perdas (volatilização; adsorção; lixiviação, erosão, etc.) no solo. Admite-se fator de eficiência de 50; 30 e 70% para N, P e K, respectivamente, correspondendo ao valor de f igual a: 0,50; 0,30; 0,70 respectivamente. Assim, observa-se que são utilizados na adubação 2 vezes mais N; 3,3 vezes mais P e 1,4 vezes mais K para garantir a adequada nutrição das plantas.

Existem outras áreas correlatas à nutrição de plantas, como fitopatologia, microbiologia, melhoramento vegetal e, até da mecanização.

**1.2 Conceito de nutriente e critérios de essencialidade**

Na natureza, existem muitos elementos químicos sem considerar os isótopos, conforme ilustra a tabela periódica abaixo com mais de uma centena de elementos químicos, sujeita a aumento com novas descobertas pela ciência, que pode ocorrer inclusive por síntese em laboratório.

1																	2																	
1	H																	He																
2	3	4																	5	6	7	8	9	10										
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne										
3	11	12	13	14	15	16	17	18																	19	20								
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar																	K	Ca								
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112																						
7	Fr	Ra	*Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112																						

*Lantanídeos	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinídeos	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Radionuclídeos	3	14	40	60	89	90	137	210	210	222	226	228	228	230	232	235	238
	H	C	K	Co	Sr	Sr	Cs	Pb	Po	Rn	Ra	Ra	Th	Th	Th	U	U

Entretanto, quando se realiza a análise química do tecido vegetal, é comum encontrar cerca de meia centena de elementos químicos; entretanto, nem todos são considerados nutrientes de planta. Isso ocorre porque as plantas têm habilidade de absorver do solo ou da solução nutritiva, os elementos químicos disponíveis sem grandes restrições, podendo ser um nutriente ou um elemento benéfico e/ou tóxico. Salienta-se que as considerações a respeito do elemento benéfico e/ou tóxico serão abordadas no próximo item.

Quanto ao nutriente, este é definido como um elemento químico essencial às plantas, ou seja, sem ele a planta não vive. Para que um elemento químico seja considerado nutriente, é preciso atender aos dois critérios de essencialidade, o direto ou o indireto ou ambos, que foram propostos por Arnon & Stout (1939), fisiologistas da Universidade da Califórnia, conforme segue:

**Direto:**

- a) O elemento participa de algum composto ou de alguma reação, sem a qual a planta não vive;

**Indireto:**

- a) Na ausência do elemento a planta não completa o seu ciclo de produção (vegetativo e reprodutivo).
- b) O elemento não pode ser substituído por nenhum outro.

c) 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 ao vegetal.

A literatura mundial considera dezesseis elementos químicos como nutrientes de plantas, a saber: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo. Os nutrientes são importantes para a vida, porque desempenham funções importantes no metabolismo da mesma, seja como substrato (composto orgânico) ou em sistemas enzimáticos. De forma geral, tais funções podem ser classificadas como:

- Estrutural (faz parte da estrutura de qualquer composto orgânico vital para a planta);
- Constituinte de enzima (faz parte de uma estrutura específica, grupo prostético/ativo de enzimas);
- Ativador enzimático (não faz parte da estrutura). Salienta-se que o nutriente, não só atua como, também, inibe sistemas enzimáticos, afetando a velocidade de muitas reações no metabolismo do vegetal.

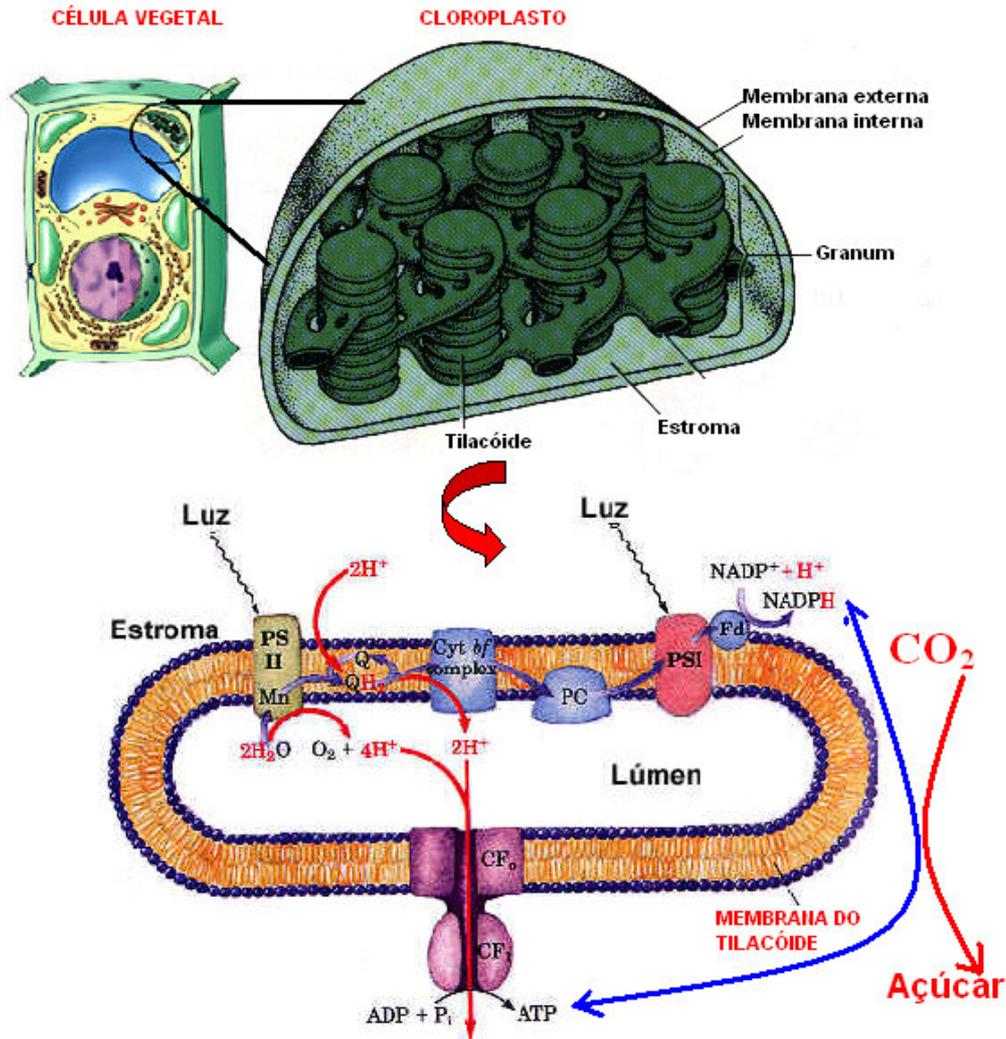
Nos próximos capítulos serão discutidas as funções de cada nutriente.

Quando um dado nutriente desempenha tais funções na planta, são afetados diversos processos fisiológicos importantes (fotossíntese, respiração etc) que têm influência no crescimento e produção das culturas. A fotossíntese é uma reação físico-química mais importante do planeta, uma vez que todas as formas de vida dependem dela. A reação físico-química da fotossíntese ocorre em dois passos. Durante a **fase fotoquímica ou luminosa**, a luz do sol é utilizada para desdobrar a molécula de água ( $H_2O$ ) em oxigênio ( $O_2$ ), e os produtos primários ATP e o  $NADPH_2$ . Assim, a captura da energia luminosa é usada para permitir a transferência de elétrons por uma série de compostos que agem como doadores de elétron e receptores de elétron. A fotólise da molécula de água e o transporte de elétrons permitem a criação de um gradiente de prótons entre o lúmen do tilacóide e o estroma do cloroplasto. A maioria de elétrons no final das contas reduz  $NADP^+$  em  $NADPH$ . A energia luminosa também é usada para gerar uma força motiva de próton através da membrana do tilacóide que é usada para sintetizar ATP via complexo ATP-sintase. Na **fase não luminosa ou ciclo fotossintético redutivo do carbono**, é uma etapa basicamente enzimática, na qual a luz não é necessária, os produtos primários da etapa anterior que serão são utilizados para, a partir do dióxido de carbono ( $CO_2$ ), obter hidratos de carbono ( $C_n(H_2O)_n$ ), como a glicose. A energia livre para a redução de um mol de  $CO_2$  até o nível de glicose é de  $478 \text{ kJ mol}^{-1}$ .

Salienta-se que o processo fotossintético ocorre dentro dos cloroplastos, que são plastídeos localizados em células do mesófilo paliçádico e do lacunoso. O número de cloroplastos por célula varia de um a mais de cem, dependendo do tipo de planta e das condições de crescimento. Os cloroplastos têm forma discóide com diâmetro de 5 a 10 micras, limitado por uma dupla membrana (externa e interna). A membrana interna atua como uma barreira controlando o fluxo de moléculas orgânicas e íons dentro e fora do cloroplasto. Moléculas pequenas como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  passam livremente através das membranas do cloroplasto. Internamente, o cloroplasto é composto de um sistema complexo de membranas *tilacoidais*, que contêm a maioria das proteínas necessárias para a etapa fotoquímica da fotossíntese. As proteínas requeridas para a fixação e redução do  $\text{CO}_2$  estão localizadas na matriz incolor denominado *estroma*. As membranas tilacoidais formam os *tilacóides*, que são vesículas achatadas com um espaço interno aquoso chamado *lumen*. Os tilacóides, em certas regiões, se dispõem em pilhas chamadas de *granum* (Figura 1). Assim, a primeira etapa da fotossíntese ocorre nas membranas internas dos cloroplastos, os tilacóides, enquanto que a segunda etapa ocorre no estroma dos cloroplastos, a região aquosa que cerca o tilacóides.

Pode-se adiantar que o processo fotossintético em si depende também de alguns nutrientes que atuam com função estrutural ou enzimática e ainda, os produtos formados pela fotossíntese, como a glicose também dependerá dos nutrientes para produzir outros compostos orgânicos vitais para o desenvolvimento e a produção das plantas, que serão detalhados nos próximos capítulos.

Assim, percebe-se a importância dos nutrientes na vida das plantas. De acordo com a história da nutrição de plantas, estes elementos químicos, que atualmente são considerados nutrientes de plantas, foram descobertos e demonstrada a sua essencialidade a partir do ano de 1804 até recentemente, sendo o último, em 1954 (Tabela 1). É pertinente salientar que na literatura existem divergências sobre o autor que demonstrou a essencialidade de um dado nutriente, muito das vezes devido ao problemas no rigor científico da pesquisa. Um exemplo deste fato, é o boro, que é indicado como autor da sua essencialidade ao Warington (1923).



**Figura 1.** Esquema de uma célula vegetal, do cloroplasto e processo fotossintético

**Tabela 1.** Descoberta e demonstração da essencialidade dos nutrientes de plantas (Class, 1989).

Nutrientes	Massa atômica	Descobridor	Ano	Demonstração	Ano
C	12,01	-	-	De Saussure	1804
H	1,01	Cavendish	1774	De Saussure	1804
O	16,00	Priestley	1774	De Saussure	1804
N	14,01	Rutherford	1772	De Saussure	1804
P	30,98	Brand	1772	Ville	1860
S	32,07	-	-	Von Sachs, Knop	1865
K	39,10	Davy	1807	Von Sachs, Knop	1860
Ca	40,08	Davy	1807	Von Sachs, Knop	1860
Mg	24,32	Davy	1808	Von Sachs, Knop	1860
Fe	55,85	-	-	Von Sachs, Knop	1860
Mn	54,94	Scheele	1744	McHargue	1922
Cu	63,54	-	-	Sommer	1931
Zn	65,38	-	-	Sommer & Lipman	1926
B	10,82	Gay Lussac & Thenard	1808	Sommer & Lipman	1939
Mo	95,95	Hzelm	1782	Arnon & Stout	1939
Cl	35,46	Schell	1774	Broyer et al.	1954

Embora estes nutrientes sejam igualmente importantes para a produção vegetal, existe uma classificação, baseada na proporção em que aparecem na matéria seca dos vegetais. Portanto, existem dois grandes grupos de nutrientes de plantas (não considerando C, H e O):

**Macronutrientes** – São os nutrientes que são absorvidos ou exigidos pelas plantas em maiores quantidades: **N, P, K, Ca, Mg e S** (expresso em  $\text{g kg}^{-1}$  de matéria seca). Os macronutrientes podem ainda ser divididos em macronutrientes primários que são N, P e K e os macronutrientes secundários que são o Ca, Mg e S.

**Micronutrientes** – São os nutrientes que são absorvidos ou exigidos pelas plantas em menores quantidades: **Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo** (expresso em  $\text{mg kg}^{-1}$  de matéria seca).

Em alguns casos, culturas acumuladoras de determinados micronutrientes pode apresentar teor deste nutriente maior que um macronutriente. Neste sentido, Prado (2003) verificou em caramboleira em formação, que o teor foliar de Mn ( $1,7 \text{ g kg}^{-1}$ ) superou até um macronutriente S ( $1,4 \text{ g kg}^{-1}$ ). Assim, sugeriram outros sistemas de classificação dos nutrientes, baseada não na quantidade acumulada pela planta, e sim agrupados em função do papel (bioquímico) que desempenha na vida da planta. Deste modo, Mengel & Kirkby (1987), classificaram os nutrientes em quatro grupos. O primeiro grupo é formado pelo C, H, O, N e S, considerados nutrientes estruturais constituinte da matéria orgânica e também com participação em sistemas enzimáticos; assimilação em reações de oxi-redução. O segundo grupo é composto pelo P e o B, e em algumas culturas o Si, sendo nutrientes que formam com facilidade ligações do tipo éster (transferidores de energia). O terceiro grupo é formado pelo K, Mg, Ca, Mn, Cl, (Na), considerados nutrientes responsáveis pela atividade enzimática e também atuam na manutenção do potencial osmótico, no balanço de íons e no potencial elétrico, especialmente o K e Mg. E no último grupo têm-se o Fe, Cu, Zn e Mo, que atuam como grupos prostéticos de sistemas enzimáticos e também participam no transporte de elétrons (Fe e Cu) para diversos sistemas bioquímicos.

Cabe salientar que a lista dos dezesseis elementos químicos, considerados essenciais pode aumentar com o avanço da pesquisa. Entretanto, para que um elemento químico seja incluído nesta lista (caso ocorra é mais provável ser um micronutriente), estudos adicionais são necessários, de forma que satisfaça aos critérios de essencialidade, em número considerável de espécies de plantas, para que a comunidade científica internacional seja convencida. Neste sentido, existem “fortes candidatos” para a ampliação da lista de nutrientes como o Si, o Na (Malavolta et al., 1997) e o Ni (Brown et al., 1987).

### 1.3 Composição relativa de nutrientes nas plantas

Em uma planta colhida fresca, dependendo da espécie, pode-se observar que a maior proporção de sua massa, de 70 até 95%, é constituído por água (H<sub>2</sub>O). Após a secagem desta planta em estufa (circulação forçada de ar, a 70°C por 24-48 horas), evapora-se a água e obtém-se a matéria seca ou massa seca e quando submetida a mineralização seja em forno mufla (300°C) ou ácido forte, separa-se o componente orgânico e o mineral (nutrientes). Realizando-se análise deste material vegetal seco, observa-se de uma maneira geral, o predomínio de C, H e O, compondo 92% da matéria seca das plantas (Tabela 2). Salienta-se que os resultados da análise química do material vegetal é expresso com base na matéria seca pois esta é mais estável que a fresca que varia de acordo com meio ou seja com a hora do dia, com água disponível no solo, temperatura, entre outros.

Ressalta-se que o C provém do ar atmosférico na forma de gás carbono, CO<sub>2</sub>; o H e O vêm da água, H<sub>2</sub>O; enquanto os minerais (macro e micronutrientes) vêm do solo, direta ou indiretamente; portanto, percebe-se que o nutriente das plantas provém de três sistemas ar, água e solo. Assim, cerca de 92% da matéria seca das plantas provém dos sistemas ar e água e apenas 8% provém do solo, entretanto, embora este último seja menos importante, quantitativamente, em relação aos demais, é o mais discutido nos estudos de nutrição de plantas e, também, o mais dispendioso aos sistemas de produção agrícola, especialmente se considerarmos que o ar e água da chuva têm “custo zero” (em sistema de produção não irrigado).

**Tabela 2.** Composição relativa dos nutrientes presente na matéria seca das plantas

Classificação	Nutriente (forma elementar) <sup>1</sup>	Participação %	Total
Macronutrientes orgânicos	<b>C</b>	42	<b>92</b>
	<b>O</b>	44	
	<b>H</b>	6	
Macronutrientes	<b>N</b>	2,0	<b>7</b>
	<b>P</b>	0,4	
	<b>K</b>	2,5	
	<b>Ca</b>	1,3	
	<b>Mg</b>	0,4	
	<b>S</b>	0,4	
Micronutrientes	<b>Cl, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo</b>		<b>1</b>
Total geral			<b>100</b>

<sup>1</sup> Nem sempre a forma elementar dos nutrientes é a forma química que as plantas absorvem.

### 1.4 Acúmulo de nutrientes pelas culturas e a formação de colheita

De forma geral, as culturas apresentam suas necessidades nutricionais, que representam as quantidades de macro e micronutrientes que as plantas retiram do solo, ao longo do cultivo para atender a todas as fases de desenvolvimento, expressando em colheitas adequadas (máximas econômicas).

Observa-se, assim, que as culturas em geral, e também a cana-de-açúcar, soja e trigo, apresentam como regra, alta exigência em nitrogênio e/ou potássio e em cobre e molibdênio (Tabela 3); entretanto, a ordem de exigências para os demais nutrientes pode sofrer variações entre as culturas e até entre cultivar/híbrido. A ordem padrão, decrescente de extração das culturas em geral, é a seguinte:

**Macronutrientes:** N > K > Ca > Mg > P ↔ S

**Micronutrientes:** Cl > Fe > Mn > Zn > B > Cu > Mo

**Tabela 3.** Extração total (parte aérea) e exportação pela colheita (colmos/grãos) de culturas comerciais

Nutriente	Cana-de-açúcar (100 t ha <sup>-1</sup> )			Soja (5,6 t ha <sup>-1</sup> )			Trigo (3,0 t ha <sup>-1</sup> )		
	Colmos	Folhas	Total	Grãos	Restos culturais	Total	Grãos	Restos culturais	Total
	<b>kg ha<sup>-1</sup></b>								
N	90	60	<b>150</b>	152	29	<b>181</b>	75	50	<b>125</b>
P	10	0	<b>20</b>	11	2	<b>13</b>	15	7	<b>22</b>
K	65	90	<b>155</b>	43	34	<b>77</b>	12	80	<b>92</b>
Ca	60	10	<b>100</b>	8	43	<b>51</b>	3	13	<b>16</b>
Mg	35	17	<b>52</b>	6	20	<b>26</b>	9	5	<b>14</b>
S	25	10	<b>45</b>	4	2	<b>6</b>	5	9	<b>14</b>
	<b>g ha<sup>-1</sup></b>								
B	200	100	<b>300</b>	58	131	<b>189</b>	100	200	<b>300</b>
Cu	180	90	<b>270</b>	34	30	<b>64</b>	17	14	<b>31</b>
Fe	2500	1400	<b>8900</b>	275	840	<b>1115</b>	190	500	<b>690</b>
Mn	1200	4500	<b>5700</b>	102	210	<b>312</b>	140	320	<b>460</b>
Mo	-	-	<b>-</b>	11	2	<b>13</b>	-	-	<b>-</b>
Zn	500	220	<b>720</b>	102	43	<b>145</b>	120	80	<b>200</b>

Mas, considerando, as culturas apresentadas na Tabela 3, nota-se que houve alteração para esta ordem de extração total de nutrientes. Nos macronutrientes, observa-se na cana-de-açúcar, maior exigência para o K em relação ao N, enquanto no trigo, o S aparece como 3º nutriente mais exigido. Para os micronutrientes, nota-se que o Cl é o mais extraído (não citado) entretanto, o mesmo na alteração da ordem-

padrão ocorre especialmente entre o Zn e o B, sendo, por exemplo, a cana-de-açúcar mais exigente em Zn, e a soja e o trigo em B.

Com relação à **exportação** dos nutrientes levados da área agrícola, tem-se significativa quantidade de elementos mobilizados no produto da colheita (colmo ou grão) (Tabela 3). Nota-se que parte significativa do P, que é mobilizada nos grãos, é exportada. Na prática, as culturas que exportam com a colheita grande parte dos nutrientes absorvidos, ou aquelas que o produto colhido é toda a parte aérea (cana-de-açúcar, milho silagem, pastagem) deixam muito pouco restos de cultura e, assim, merecem mais atenção em termos de necessidade de reposição destes nutrientes, por meios de adubação de manutenção.

Neste sentido, os estudos sobre a extração de nutrientes podem identificar nas culturas a exigência nutricional para um determinado nutriente e, assim, é possível atender a sua demanda, incrementando a produção da cultura.

Na agricultura brasileira, muitas vezes, a aplicação dos fertilizantes pode não estar satisfazendo as exigências nutricionais das culturas, e conseqüentemente, a produção agrícola pode ser limitada. Este fato pode ser verificado, quando se compara a exigência nutricional das plantas e o consumo médio de fertilizantes utilizados nas respectivas culturas (Tabela 4). Ressalta-se que a exigência das culturas foram obtidas para nível de produtividade próxima da média nacional. Por estes resultados médios pode-se inferir que pode estar ocorrendo um esgotamento da fertilidade dos solos (já pobre).

**Tabela 4.** Exigência nutricional e consumo aparente de fertilizantes (N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O) de algumas culturas

Cultura	Exigência nutricional total <sup>4</sup>		Consumo de fertilizantes <sup>2</sup>
	N+P+K	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O <sup>1</sup>	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O
Soja <sup>3</sup> (2,8 t ha <sup>-1</sup> )	90(54)+7+38	152 (97)	145
Cana-de-açúcar (73,0 t ha <sup>-1</sup> )	73+9,7+76	186	206
Citros (26 t ha <sup>-1</sup> ) (fruta fresca)	66,5+8,3+52	192	122
Milho (3,7 t ha <sup>-1</sup> )	176+32+149	430	110
Arroz (3,2 t ha <sup>-1</sup> )	82+8+47	157	77
Feijão (1 t ha <sup>-1</sup> )	102+9+93	235	31
Mandioca (16,6 mil plantas)	187+15+98	339	8

Obs. <sup>1</sup> Px2,29136 = P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; Kx1,20458 = K<sub>2</sub>O; <sup>2</sup> ANDA (1999); <sup>3</sup> Na soja, estima-se que 60% da exigência em N provém da fixação biológica, e o restante do solo (54 kg ha<sup>-1</sup> de N); <sup>4</sup> A necessidade de adubação é maior que a exigência nutricional pois existem perdas dos nutrientes no solo, em média para N, P e K é de 50, 70 e 30%, respectivamente.

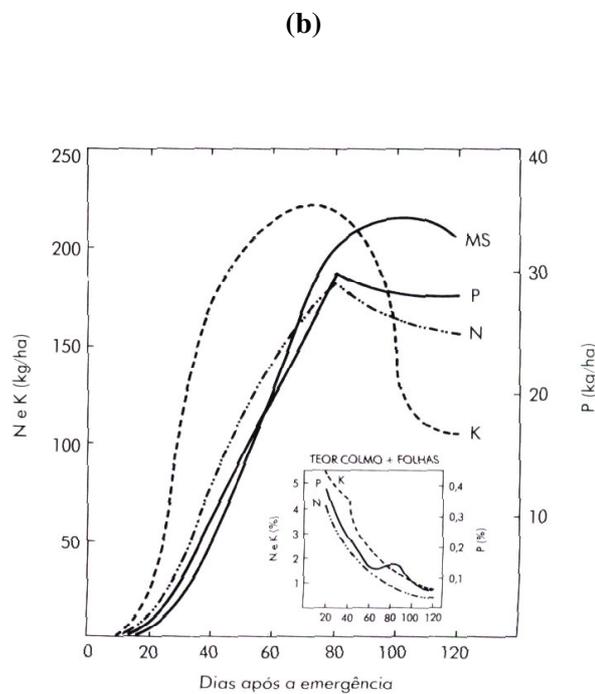
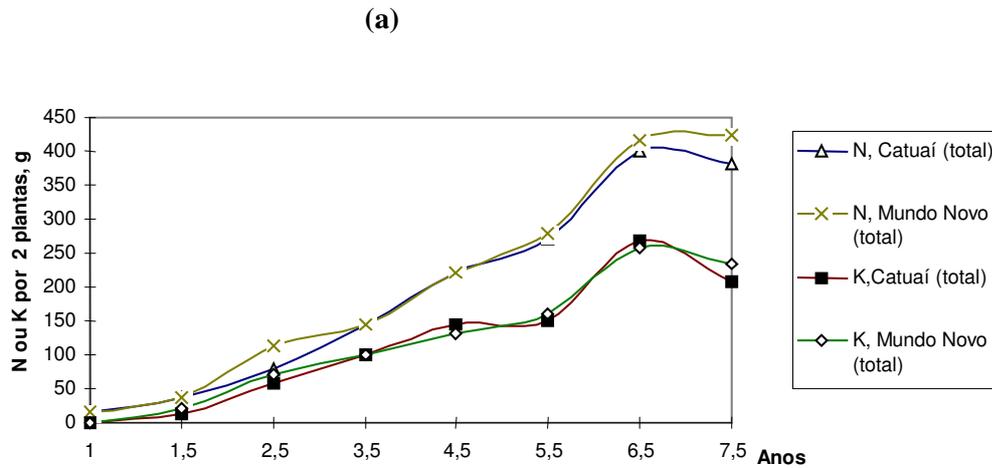
Estes resultados estão de acordo com os observados pelos pesquisadores do Centro Internacional de Desenvolvimento de Fertilizantes (IFDC) que, recentemente, constataram, também, que a maioria dos solos agricultáveis do mundo estão sendo exauridos, em alguns nutrientes, exceto América do Norte, Oeste Europeu e Austrália/Nova Zelândia. Os autores concluem que, se mantida esta tecnologia agrícola, a produção necessária de alimentos para o futuro (a partir do ano de 2020) não será atingida.

Ainda em relação à exigência nutricional, é satisfatório admitir que a extração dos nutrientes do solo não ocorre de forma constante ao longo do ciclo de produção da cultura. Na prática, a curva de extração de nutriente ao longo do tempo de cultivo (marcha de absorção), segue a do crescimento da planta, explicado por uma “curva sigmóide”. É caracterizada por uma fase inicial de baixo crescimento e absorção de nutrientes e, na fase seguinte, têm-se crescimento rápido (quase linear) da planta com elevada taxa de absorção/acúmulo de nutrientes e, depois, uma estabilização no crescimento/desenvolvimento e também na absorção de nutrientes da planta, até completar o ciclo de produção. Entretanto, no final desta última fase, o acúmulo de certos nutrientes (K, N) pode estabilizar ou até sofrer diminuição no acúmulo, devido às perdas de folhas senescentes e também perda do nutriente da própria folha (lavagem de K). Este padrão da marcha de absorção de nutrientes ocorre tanto em culturas perenes como cafeeiro (Figura 2a), como em anuais como o milho (Figura 2b), (Bull & Cantarella, 1993).

Em soja, Bataglia & Mascarenhas (1977) verificaram para cada nutriente, um período de exigência máxima, que corresponderia a velocidade máxima de acúmulo do nutriente pela planta (Tabela 5). No milho, para a maioria dos nutrientes, a velocidade máxima de acúmulo seria no período de 60-90 dias, que também corresponde à máxima acumulação de matéria seca. Para o P e o K, a máxima velocidade de acumulação ocorre mais precocemente, aos 30-60 dias. Entretanto, a aplicação do nutriente, a exemplo do K, a aplicação deve ocorrer, preferencialmente, até os 30 dias, que corresponde ao início do período de exigência máxima da cultura.

É pertinente salientar que embora a maioria dos trabalhos da literatura tenha estabelecido a marcha de absorção utilizando dados cronológicos (em dias), entretanto, as plantas desenvolvem-se à medida que se acumulam unidades térmicas acima de uma temperatura base, ao passo que abaixo dessa temperatura o crescimento cessa. Assim, através do acúmulo térmico, também conhecido como graus-dia, têm-se obtido ótimas correlações com a duração do ciclo da cultura, ou com os estádios do desenvolvimento fenológico de

uma dada cultivar. Portanto, seria interessante que novos trabalhos que tratam de marcha de absorção seja desenvolvidos em função dos graus-dias acumulado durante o ciclo da cultura.



**Figura 2.** Marcha de absorção do N e do K pelo cafeeiro (Corrêa et al.,1986) e de N, P e K pela cultura do milho (Bull & Cantarella, 1993).

Assim, estudos de marcha de absorção, tornam-se importantes para detectar em que fase de desenvolvimento a cultura apresenta maior exigência em um determinado nutriente, ou seja, em qual fase têm-se a maior velocidade de absorção do nutriente. Logo, diante desta informação, pode-se prever com

antecedência o momento da aplicação do nutriente para satisfazer à exigência nutricional no respectivo estágio de desenvolvimento da cultura.

**Tabela 5.** Velocidade de acúmulo de matéria seca (M.S.) e de absorção de nutrientes em função do estágio de desenvolvimento da soja cv. Santa Rosa (Bataglia & Mascarenhas, 1977)

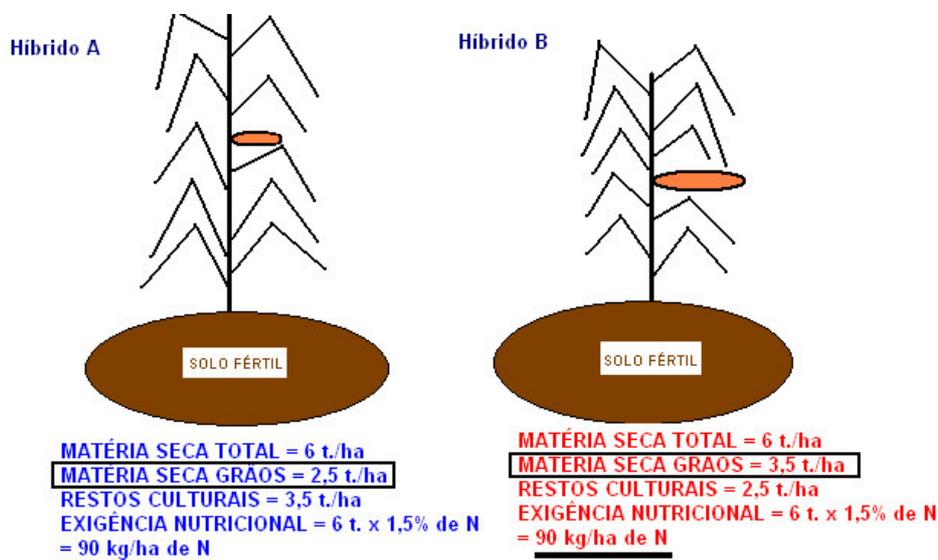
Nutriente/M.S.	Dias após a semeadura			
	0-30	30-60	60-90	90-120
	kg/ha/dia			
M.S.	12,00	69,00	80,00	42,00
N	0,38	1,69	2,90	2,30
P	0,03	0,17	0,17	0,17
K	0,16	1,21	0,78	0,27
Ca	0,11	0,78	0,86	-
Mg	0,05	0,36	0,39	0,19
S	0,01	0,04	0,09	0,05
	g/ha/dia			
B	0,2	1,0	1,8	0,6
Cl	2,2	17,4	14,9	17,2
Cu	0,2	0,9	1,2	0,02
Fe	5,7	9,0	15,4	2,6
Mn	0,3	3,2	5,7	-
Mo	0,01	0,17	0,24	0,23
Zn	0,4	2,0	2,1	1,2

Cabe salientar que a exigência nutricional das culturas é específica para a espécie e até para o cultivar/variedade de uma mesma espécie. Dessa forma, serão discutidas para cada nutriente estas diferenças nutricionais entre as culturas durante apresentação dos capítulos.

A agricultura moderna exige a máxima produção econômica com respeito ao meio ambiente. Para isto, o produtor brasileiro tem um grande desafio, frente à baixa fertilidade dos solos tropicais e alto valor dos fertilizantes, fonte dos nutrientes. Uma saída racional para a exploração agrícola em bases sustentáveis seria “adaptar a planta ao solo” a partir do uso de culturas/cultivares que sejam eficientes no processo de formação de colheita “fazendo mais com menos”. Como a absorção, o transporte e a redistribuição de nutrientes apresentam controle genético, existe a possibilidade de melhorar e, ou, selecionar cultivares mais eficientes quanto ao uso de nutrientes (Gabelman & Gerloff, 1983). Portanto, para que a planta apresente alta eficiência de uso dos nutrientes, é preciso otimizar diversos processos fisiológicos e bioquímicos para formação da colheita. Neste sentido, os possíveis mecanismos de controle das necessidades nutricionais das plantas abrangem a aquisição dos nutrientes do ambiente (solo ou solução nutritiva), sua movimentação por

meio das raízes e liberação no xilema, sua distribuição nos órgãos e utilização no metabolismo e crescimento (Marschner, 1986).

Desse modo, pode existir uma cultura com mesma exigência nutricional; entretanto, agronomicamente mais eficiente. Neste sentido, um determinado híbrido de trigo A pode acumular a mesma quantidade de nitrogênio, por exemplo, que um híbrido B. Entretanto, o híbrido B usa o N para maior produção de grãos, comparado ao híbrido A que prioriza maior produção de órgãos vegetativos (restos culturais). Assim, para a mesma produção de matéria seca ( $6 \text{ t ha}^{-1}$ ), o híbrido B produz 40% mais grãos que o híbrido A, entretanto, ambos acumulam na parte aérea a mesma a quantidade de N ( $90 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 3).



**Figura 3.** Esquema ilustrativo do acúmulo de matéria seca em diversos órgãos em dois híbridos de trigo e a exigência ao nitrogênio.

Assim surgiu o termo eficiência de uso de nutrientes, que é a habilidade de uma espécie ou genótipo em fornecer altas produções mesmo num solo deficiente no nutriente em estudo (Graham, 1984) ou ainda, é a relação entre produção e a concentração do nutriente no tecido (Lauchli, 1987). Portanto, uma espécie ou cultivar com eficiência nutricional superior é capaz de desenvolver e ter uma adequada produção em solo de baixa fertilidade, devido a alta habilidade de absorver os nutrientes necessários, em menor quantidade, e, ou, distribuí-los de maneira mais eficiente nos diversos componentes da planta, garantir adequado metabolismo vegetal com alta conversão em matéria seca.

A partir da matéria seca e do conteúdo dos nutrientes na planta, pode-se calcular os índices nutricionais que compreendem a eficiência de absorção, de translocação e por fim de utilização dos nutrientes para conversão em matéria seca. Estes índices são apresentados a seguir:

**(a) eficiência de absorção** = (conteúdo total do nutriente na planta)/(matéria seca de raízes) (Swiader et al., 1994); Este índice indica a capacidade de “extração” da planta de nutrientes do meio de cultivo (solo). Salienta-se, que os mecanismos desenvolvidos nas plantas para alta eficiência de absorção diferem entre as espécies. Algumas produzem extensivo sistema radicular e outras têm alta taxa de absorção por unidade de comprimento radicular, ou seja, alto influxo de nutrientes (Föhse et al., 1988).

**(b) eficiência de translocação** = ((conteúdo do nutriente na parte aérea)/(conteúdo total do nutriente na planta)) x 100 (Li et al., 1991). Este índice indica a capacidade da planta de transportar os nutrientes da raiz para a parte aérea.

**(c) eficiência de utilização (coeficiente de utilização biológica)** = (matéria seca total produzida)<sup>2</sup>/(conteúdo total do nutriente na planta) (Siddiqi & Glass, 1981); Este índice indica a capacidade da planta em converter o nutriente absorvido em matéria seca total. Segundo Gerloff & Gabelman (1983), a capacidade de uma planta redistribuir e reutilizar os minerais de um órgão mais velho e senescente, caracteriza eficiência de uso no metabolismo do processo de crescimento.

A experimentação, que objetiva avaliar a eficiência nutricional de cultivares e até mesma eficiência de fontes de fertilizantes, são utilizados diversos tipos de índices de eficiências nutricionais que muito das vezes semelhantes com pequena variação. Normalmente, as eficiências citadas anteriormente, são mais utilizadas em ensaios em vasos, visto a maior facilidade em trabalhar com sistema radicular das plantas, comparado as condições de campo. Esta linha de pesquisa na nutrição de plantas torna-se muito importante, visto que o uso adequado de nutrientes é fundamental para aumentar ou sustentar a produção agrícola.

Neste sentido, Fageria (2000) verificou uma maior correlação com a produção do arroz a eficiência agrônômica e a eficiência agrofisiológica e por último a eficiência fisiológica (semelhante a eficiência de uso apresentada anteriormente). Assim, serão apresentadas as formas de cálculo das eficiências nutricionais

(agronômica, fisiológica, agrofisiológica, recuperação e utilização), sendo muito utilizadas em ensaios de campo, conforme indicação de Fageria et al. (1997):

**(d) Eficiência agrônômica (EA)** =  $(PG_{cf} - PG_{sf}) / (QN_a)$ , dada em  $mg\ mg^{-1}$ , onde:  $PG_{cf}$  = produção de grãos com fertilizante,  $PG_{sf}$  = produção de grãos sem fertilizante e  $QN_a$  = quantidade de nutriente aplicado. Este índice indica a capacidade de produção de grãos por unidade de fertilizantes aplicado no solo.

**(e) Eficiência fisiológica (EF)** =  $(PTB_{cf} - PTB_{sf}) / (AN_{cf} - AN_{sf})$ , dada em  $mg\ mg^{-1}$ , onde:  $PTB_{cf}$  = produção total biológica (parte aérea e grãos) com fertilizante;  $PTB_{sf}$  = produção total biológica sem fertilizante;  $AN_{cf}$  = acumulação de nutriente com fertilizante e  $AN_{sf}$  = acumulação de nutriente sem fertilizante. Este índice indica a capacidade de produção da parte aérea total por unidade de nutriente acumulado na planta.

**(f) Eficiência agrofisiológica (EAF)** =  $(PG_{cf} - PG_{sf}) / (AN_{cf} - AN_{sf})$ , dada em  $mg\ mg^{-1}$ , onde:  $PG_{cf}$  = produção de grãos com fertilizante,  $PG_{sf}$  = produção de grãos sem fertilizante,  $AN_{cf}$  = acumulação de nutriente com fertilizante e  $AN_{sf}$  = acumulação de nutriente sem fertilizante. Este índice é semelhante ao anterior, entretanto, indica a capacidade específica de produção de grãos por unidade de nutriente acumulado na planta.

**(g) Eficiência de recuperação (ER)** =  $(AN_{cf} - AN_{sf}) / 100(QN_a)$ , dada em porcentagem, onde:  $AN_{cf}$  = acumulação de nutriente com fertilizante,  $AN_{sf}$  = acumulação de nutriente sem fertilizante e  $QN_a$  = quantidade de nutriente aplicado. Este índice indica o quanto do nutriente aplicado no solo a planta conseguiu absorver.

**(h) Eficiência de utilização (EU)** = eficiência fisiológica (EF) x eficiência de recuperação (ER). Este índice indica a capacidade de produção da parte aérea total por unidade de nutriente aplicado. O presente índice difere do índice (c) pois este computa eficiência de recuperação do fertilizante ou seja a capacidade da planta para absorção/aquisição de nutriente do solo.

Assim, nestes experimentos, cultivam-se as plantas em solo com teor baixo e alto do dado nutriente. As plantas que tiverem melhor eficiência nutricional em solo com baixo teor do nutriente é dito como eficiente, ou seja, produz mais em condições de estresse. Enquanto, as plantas que apresentam os melhores índices nutricionais quando submetida a teor alto no solo do dado nutriente é dito que são plantas responsivas.

## 1.5 Outros elementos químicos de interesse na nutrição vegetal

Além dos elementos ditos essenciais à vida das plantas, existem outros considerados benéficos e, também, o grupo dos elementos tóxicos. Quanto ao **elemento benéfico**, este é definido como aquele que estimula o crescimento dos vegetais, mas que não são essenciais ou que são essenciais somente para certas espécies ou sob determinadas condições (Marschner, 1986). O silício e o cobalto são considerados benéficos ao crescimento de certas plantas, bem como o Na, o Ni e o Se. Salienta-se que mesmo um nutriente ou elemento benéfico, quando presente em concentrações elevadas na solução do solo, poderá ser tóxico às plantas. Entretanto, é considerado um **elemento tóxico**, o que não se enquadra como um nutriente ou elemento benéfico. Assim, os elementos tóxicos, mesmo em concentrações baixas no ambiente, podem apresentar alto potencial maléfico, acumulando-se na cadeia trófica e diminuindo o crescimento podendo levar à morte do vegetal. Como exemplo, tem-se: Al, Cd, Pb, Hg etc. O alumínio tem sido muito estudado em vista que os solos tropicais têm reação ácida com alta concentração do  $Al^{+3}$  tóxico. A presença deste elemento debilita e reduz o crescimento das raízes, interferindo na absorção de nutrientes (como P, Mg, Ca e K) (Freitas et al., 2006). O estresse com alumínio aumenta a massa molecular de hemicelulose da parede celular deixando-a rígida, inibindo o alongamento das raízes (Zakir Hossain et al., 2006). Assim, uma linha de pesquisa da nutrição de plantas, busca selecionar genótipos tolerantes e buscar os mecanismos que as plantas utilizam para atenuar o efeito tóxico do elemento. Neste sentido, Jo et al. (1997), indicam dois tipos de mecanismos que as plantas tolerantes ao Al, dispõem tais como: i) mecanismos externos, em que as plantas tolerantes liberam ácidos orgânicos pela raiz, geralmente citrato e malato, que se ligam ao alumínio formando complexos estáveis impedindo a absorção pela planta; ii) mecanismos internos, em que o alumínio é absorvido para o interior da planta e conseqüentemente para a célula, onde é inativado por alguma enzima ou isolado no interior do vacúolo.

Um dos elementos benéficos, ultimamente, mais estudados, no Brasil, é o silício. As plantas, normalmente, apresentam diferentes habilidades para absorção deste elemento, podendo ser divididas quanto à capacidade de acumulação deste elemento, conforme sugere Marschner (1995):

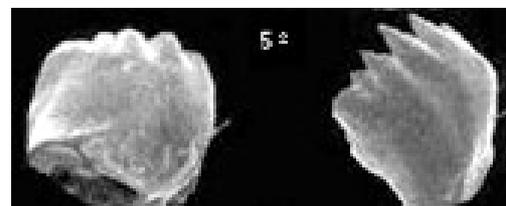
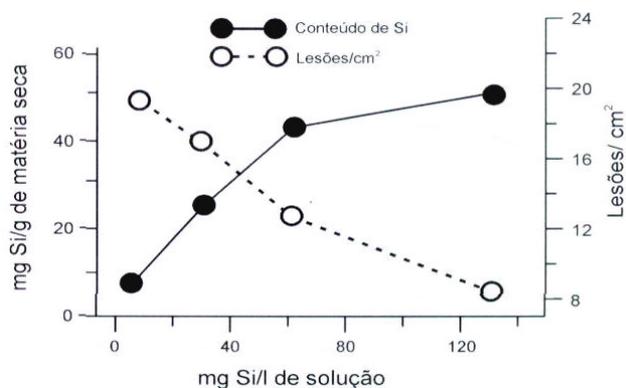
- **Plantas acumuladoras:** contêm teores de 10% a 15% de  $SiO_2$ , sendo exemplo as gramíneas como o arroz.

- **Plantas intermediárias:** contêm teores de 1% a 5% de  $\text{SiO}_2$ , sendo algumas gramíneas e cereais.
- **Plantas não acumuladoras:** contém menos de 0,5% de  $\text{SiO}_2$ , sendo exemplo a maioria das dicotiledôneas, como as leguminosas.

Miyake & Takahashi (1985) acrescentam, ainda, que existem outras diferenças nas plantas quanto à absorção de Si, além do seu teor na planta, referente à taxa de transporte. As plantas acumuladoras de Si apresentam alta taxa de transporte, enquanto nas plantas intermediárias o transporte é inferior, ao passo que nas plantas não-acumuladoras, o Si absorvido concentra-se nas raízes.

Atualmente, o Si não é considerado um nutriente “universal” das plantas; entretanto, a maioria dos autores colocam-no como benéfico.

Na literatura, existem muitos relatos dos benefícios do Si nas plantas, mas, o mais discutido é sua ação na resistência às doenças fúngicas em diversas culturas como no arroz (Figura 4a) e também redução da incidência de pragas, pela maior dificuldade de alimentação delas, maior desgaste das mandíbulas (Figura 4b) e aumento da taxa de mortalidade (Goussain et al., 2002). Este efeito do Si na redução de doenças, ocorre não apenas por um fator físico (formação de compostos que agem como barreira física abaixo da cutícula das folhas), como também químico (formação de compostos fitotóxicos aos patógenos). Salienta-se, que os estudos recentes têm indicado que as plantas ricas em Si, podem apresentar “buracos” na epiderme, sem a proteção física, de forma que os estudos que buscam isolar os compostos químicos produzidos pelas plantas têm sido um desafio aos fitopatologistas.

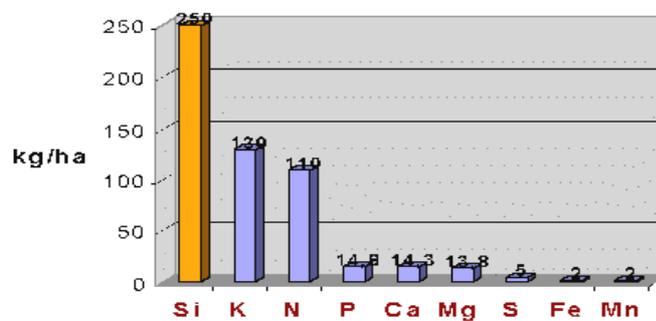


**Figura 4.** Efeito do Si na incidência de lesões foliares causado pela brusone na cultura do arroz (Marschner, 1986) (a) e mandíbulas de lagartas (*S. frugiperda*) alimentadas com folhas de milho com aplicação de Si (esquerda) e sem aplicação de Si (direita) (b).

Apenas a título de ilustração, os efeitos do Si nas plantas apresentados na literatura podem ser resumidos em:

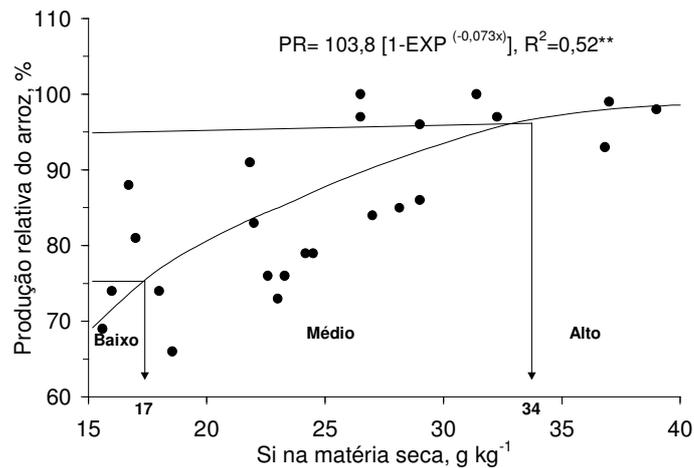
- Aumento da rigidez da célula devido a maior produção de compostos como a lignina.
- A maior rigidez celular melhora a arquitetura foliar da planta e favorece a fotossíntese.
- Aumenta a resistência das plantas a doenças fúngicas.
- Reduz a taxa de senescência foliar (Prado & Fernandes, 2000).
- Alivia a toxicidade de Fe, Mn e Al em plantas cultivadas em solos com alto teores destes elementos e redução o estresse salino.
- Maior utilização do P.
- Redução da transpiração excessiva.
- Melhora a taxa de fertilidade da planta.

Quando se compara a composição química de plantas acumuladoras de Si como o arroz, observa-se que este é o elemento mais acumulado pela planta (Figura 5). Assim observa-se acúmulo de até 250 kg ha<sup>-1</sup> de Si, indicando alta exigência da planta com relação a este elemento.



**Figura 5.** Acúmulo de nutrientes e de silício pela cultura do arroz (Körndorfer et al., 2002).

Deste modo, constata-se uma relação positiva entre o Si na planta e a produção do arroz (Figura 6).



**Figura 6.** Relação do Si na planta com a produção relativa de arroz (Korndörfer et al., 2001).

Salienta-se que a resposta das plantas ao silício são mais significativos em sistemas de produção com algum tipo de estresse, seja biótico (doenças/pragas; cultivar pouco ereta, etc) ou abiótico (déficit hídrico; excesso de metais como Al, etc).

O sódio também é considerado elemento benéfico, embora uma halófita (*Atriplex vesicaria*), tenha se apresentado como um nutriente. E em outras como efeito benéfico como aspargo, cevada, brócoli, cenoura, algodão, tomate, trigo, ervilha, aveia e alface (Subbrao et al., 2003). Um dos aspectos importante do sódio é sua capacidade de substituir parte do K em funções não-específicas, como o K vacuolar quando o suprimento deste é limitado. Desse modo, o Na substituiria o K em sua contribuição ao potencial de soluto e, conseqüentemente, na geração do turgor celular. Isto ocorre de forma significativa em grupo específico de plantas, como beterraba, espinafre, repolho, coqueiro, algodão, couve, tremoço e aveia (Lehr, 1953). Nestas culturas, há a possibilidade do uso de fertilizantes potássicos com maior proporção de sódio (menor custo), em solos não sódicos. Além disso, o Na pode afetar a concentração de CO<sub>2</sub> nas células do mesófilo da bainha e também na regeneração do PEP no cloroplasto e na síntese de clorofila.

Por fim, existem estudos indicando a essencialidade do níquel (em baixas concentrações) em algumas espécies, a exemplo da cevada demonstrado por Brown et al. (1987). Salienta-se, que muito das vezes a quantidade de Ni contida nas sementes atende a exigência destes grupos de plantas. Os estudos indicam que o Ni faz parte da urease, onde as plantas supridas de N (uréia) via foliar, podem não assimilar o N, acumulando-se uréia, provocando toxidez e outros trabalhos indicam efeito benéfico no aumento do vigor de sementes.

## 1.6 Cultivo hidropônico. Preparo e uso de soluções nutritivas

O termo hidroponia (do grego: hydro = água e ponos = trabalho) é relativamente novo, designado como cultivo sem solo. Ultimamente, o sistema de cultivo alternativo, via hidroponia, pode otimizar a produção com maior número de safras por ano e, conseqüentemente, maior produção, comparado ao sistema convencional (Tabela 6). Entretanto, a aplicação do cultivo hidropônico está restrito às culturas de ciclo rápido e de pequeno porte, como as hortaliças, flores entre outras.

**Tabela 6.** Produção de algumas hortaliças cultivadas, em estufa, com sistema hidropônico e em campo (Adaptado de Jensen & Collins, 1985).

Culturas	Sistema hidropônico			Campo t/ha/ano
	t/ha	Nº. cultivos	t/ha/ano	
Brócolis	32,5	3	97,5	10,5
Feijão vagem	11,5	4	46,0	6,0
Repolho	57,5	3	172,5	30,0
Couve chinesa	50,0	4	200,0	-
Pepino	250,0	3	750,0	30,0
Berinjela	28,0	2	56,0	20,0
Alface	31,3	10	313,0	52,0
Pimentão	32,0	3	96,0	16,0

Em cultivo comercial, a hidroponia pode ser utilizada na produção de culturas nobres de alta qualidade (livres de microorganismos, defensivos), com maior valor agregado ao produto, a exemplo de várias hortaliças.

Assim, existem algumas vantagens e desvantagens do sistema hidropônico comercial, tais como:

Vantagens:

- a) Exige menos trabalho operacional;
- b) Eliminação do preparo do solo (gastos com combustível e de aquisição de máquinas);
- c) Eliminação da rotação de culturas;
- d) Reutilização do meio de cultivo;
- e) Aumento da produção, sem a competição por nutrientes e água;
- f) Plantas uniformes quanto ao desenvolvimento;
- g) Melhor desenvolvimento radicular com maior qualidade e aumenta-se a vida de prateleira dos produtos;
- h) Baixa perda de água e nutrientes;
- i) Redução da incidência de pragas e doenças (queda na pulverização);

j) Maior aproveitamento da área agrícola;

l) Implantação da cultura sem restrição ao tipo de área (solos rasos, baixa drenagem ou alta declividade);

m) Imune a adversidades climáticas (geada/granizo).

Desvantagens:

a) Elevados custos e trabalhos iniciais;

b) Maior risco de perdas por falta de energia elétrica em sistemas automáticos;

c) Exige habilidade técnica e conhecimentos de fisiologia vegetal;

d) Balanço inadequado da solução nutritiva pode causar graves problemas às plantas;

e) Necessidade de suporte às raízes e estruturas aéreas;

f) Somente materiais inertes devem entrar em contato com as plantas;

g) Rotinas regulares;

h) Boa drenagem para não haver morte das raízes;

i) Contaminação da água afeta todo o sistema.

Na pesquisa, a hidroponia pode ser utilizada em diversos estudos como:

a) Demonstração da essencialidade de nutrientes;

b) Definição de sintomatologia de desordem nutricional, seja por deficiência, seja por excesso (toxicidade);

c) Conhecer a exigência nutricional das plantas;

d) Seleção de plantas tolerantes a estresse nutricional;

e) Mecanismos de absorção, transporte e redistribuição iônica;

f) Controle de doenças;

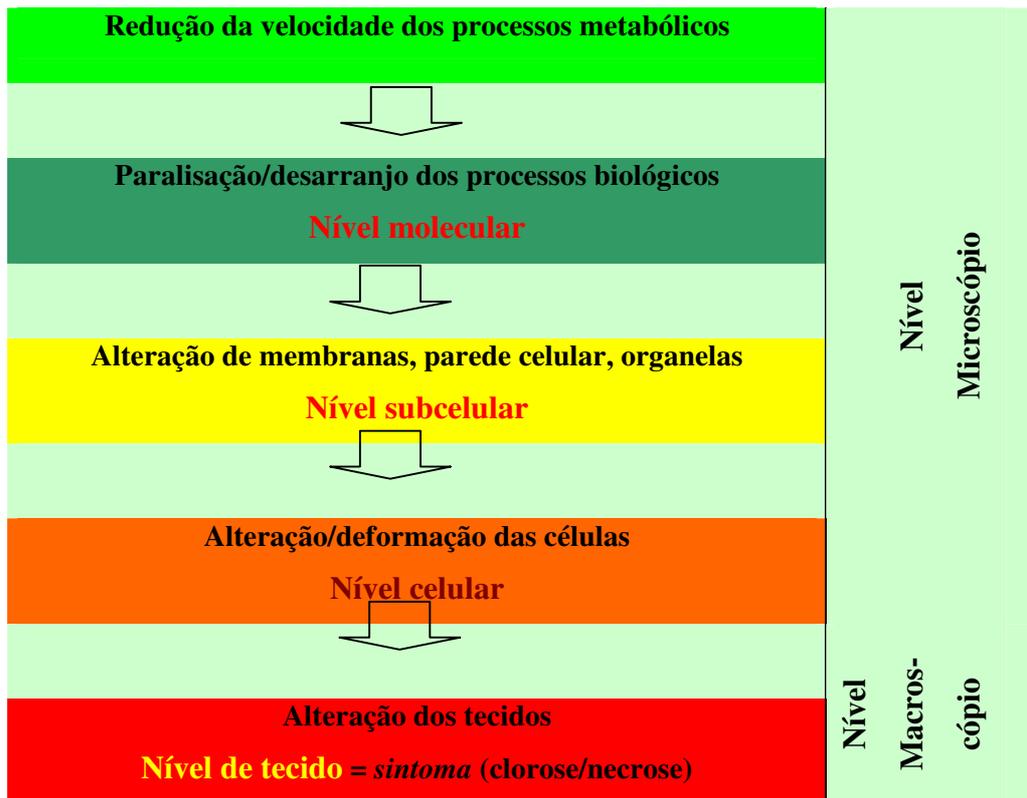
g) Qualidade de produtos em hidroponia (ex.: acúmulo de nitrato).

Um dos estudos clássicos na área de nutrição empregando a hidroponia é o uso da técnica de indução de deficiência ou técnica do elemento faltante. O uso desta técnica, inclusive foi muito utilizada para investigar as funções dos nutrientes nas plantas, a partir dos efeitos da falta do nutriente na atividade bioquímica da planta. Nessa técnica, utiliza-se uma solução completa menos o nutriente em estudo, cultivando a planta até o aparecimento da sintomatologia característica do elemento faltante, que identifica a deficiência (Figura 7). Quando a planta é submetida ao nível de estresse, como nutricional a mesma tenta aclimação, com sérias alterações no sistema hormonal (Morgan, 1990). E se o estresse prosseguir ocorre uma

série de eventos antes da injúria ser visível, e se caso ocorrer este será o último evento biológico ou seja, já a nível de tecido (Figura 8). A forma da sintomatologia é dependente da função que o respectivo nutriente desempenha na planta, e o local de ocorrência (folha velha ou nova) depende da sua mobilidade no floema das plantas.



**Figura 7.** Plantas cultivadas em solução nutritiva com todos os nutrientes (completo) com crescimento normal e o completo menos o nitrogênio (-N) (milho) (a) e o fósforo (-P) (feijão) (b), demonstrando os sintomas visuais de deficiência.



**Figura 8.** Seqüência de eventos biológicos em plantas deficientes de nutriente.

Além da descrição da sintomatologia, acompanha-se o comportamento das plantas ao longo do cultivo. Isto é feito por meio do desenvolvimento das plantas cultivadas na solução completa e da deficiente,

a partir de avaliações de crescimento (altura, diâmetro do caule, área foliar e matéria seca). Algumas plantas são sensíveis a deficiência e excesso de nutrientes. Assim, existem as plantas indicadores de deficiência dos nutrientes, como para o N (milho, maçã), o P (alface, cevada), o K (batata), o Ca (alfafa, amendoim), o Mg (couve-flor, brócolos), o S (algodão, alfafa), o Zn (citrus, pêsego), o B (beterraba, nabo, aipo, couve-flor), o Mn (maçã, cereja, citrus), o Cu (citros, amexa), o Fe (couve-flor, brócolos), o Mo (tomate, alface, espinafre) (Malavolta et al., 1997).

As técnicas de cultivo, sem solo, podem ser divididas em várias categorias, em função dos substratos (material distinto do solo) utilizados (Castellane & Araújo, 1995):

- Cultura em água ou hidroponia: as raízes das plantas são imersas em uma solução formada por água e nutrientes, denominada solução nutritiva, NFT (Técnica do Filme de Nutrientes);
- cultura em areia: as plantas são sustentadas por um substrato sólido, e as partículas possuem diâmetro entre 0,6 e 3,0 mm;
- cultura em cascalho: o substrato é sólido, com partículas de diâmetro maior que 3 mm;
- cultura em vermiculita: quando o substrato utilizado é a vermiculita ou a sua mistura com outros materiais;
- cultura em lã-de-rocha: utiliza como substrato a lã-de-rocha, lã-de-vidro ou outro material semelhante (alta porosidade e absorção de água, nutrientes e ar próximo às raízes). A lã-de-rocha tem inconveniente com relação aspecto ambiental, na época do descarte, visto que sua decomposição é muito lenta.

Não existe uma solução nutritiva ideal para todas as culturas, uma vez que é muito difícil a formulação de uma solução que garanta um desenvolvimento máximo e que todos os nutrientes sejam fornecidos exatamente na proporção em que são absorvidos. Sendo assim, a composição da solução nutritiva é influenciada por uma série de fatores:

- espécie de planta cultivada (exigência nutricional é geneticamente controlada);
- idade da planta e estágio de crescimento;
- época do ano (duração do período de luz);
- fatores ambientais (temperatura, umidade, luminosidade);
- parte da planta colhida, etc.

A composição química ou a formulação ideal da solução nutritiva é aquela que atende às exigências nutricionais da espécie cultivada em todas as fases do seu ciclo. A solução nutritiva, pode apresentar além dos nutrientes outros elementos, podendo atingir cerca de 20 elementos (Jones Jr., 1998). Neste sentido, em

um estudo realizado por Santos (2000), utilizando cultivo hidropônico NFT, foram testadas quatro soluções nutritivas, cujos resultados encontram-se na Tabela 7.

**Tabela 7.** Massa fresca de plantas de alface cultivadas em quatro soluções nutritivas NFT, no inverno e na primavera (Santos, 2000).

Solução nutritiva	Inverno	Primavera
	g por planta	
UEDA (1990)	84 c <sup>1</sup>	107c
Furlani (1995)	242a	283a
Bernardes (1997)	234a	265a
Castellane & Araújo (1995)	204b	240b
Média	191	224

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Pelos resultados, a solução proposta por Castellane & Araújo (1995) foi a de melhor desempenho, proporcionando bom número de folhas por planta e maior produtividade, seguida daquela proposta por Furlani (1995). Assim, o autor tem indicado as duas soluções para o cultivo da alface, em sistema hidropônico, no estado do Rio Grande do Sul (Tabela 8).

**Tabela 8.** Composição química das soluções nutritivas (Santos, 2000)

Componentes	Castellane & Araújo (1995)	Furlani (1995)
	g/1000 L de solução	
Nitrato de cálcio	950	1000
Monoamônio fosfato (MAP)	-	150
Fosfato MB. de potássio (MKP)	272	-
Cloreto de potássio	-	150
Nitrato de potássio	900	600
Sulfato de magnésio	246	250
Cloreto de manganês	-	1,17
Sulfato de manganês	1,70	-
Sulfato de zinco	1,15	0,44
Sulfato de cobre	0,19	0,10
Ácido bórico	2,85	1,02
Molibdato de sódio	0,12	0,13
Ferro-EDTA <sup>1</sup>	1 (L)	0,5 (L)

<sup>1</sup> Em ambas soluções utilizaram-se ferro-EDTA como fonte de ferro, obtido através da dissolução de 24,1 g de sulfato de ferro em 400 mL de água e 25,1 g sódio-EDTA em 400 mL de água quente (80°C), misturando-se as duas soluções frias, completando o volume para 1 L. Salienta-se que existem outros quelatos com maior estabilidade na solução.

É pertinente salientar que existe na literatura mais uma centena de soluções nutritivas, entretanto, são derivadas de Hoagland & Arnon (1950).

A solução nutritiva apresentada (Tabela 8), em concentração integral (100%), é utilizada em plantas já com certo desenvolvimento ou em época muito fria, pois em plantas jovens, em estádios iniciais de crescimento, estas soluções estão muito concentradas, com risco de danos fisiológicos às plantas. Assim, no

início do crescimento, utilizam-se as soluções diluídas (25 até 75%) e, à medida que a planta se desenvolve, empregam-se soluções menos diluídas, até atingir a concentração integral (100%).

Além dos nutrientes, pode utilizar ainda, o elemento benéfico na solução nutritiva, a exemplo do Si. Assim, a concentração utilizada de Si é de  $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$ , na forma de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Epstein, 1995).

Além da escolha da solução ideal, é preciso considerar, também, os fatores de manejo da solução nutritiva, visando a aumentar a eficiência produtiva de sistemas hidropônicos.

### **Fontes de fertilizantes**

As fontes de nutrientes a serem utilizadas dependem da natureza do cultivo, sendo permitidas fontes de fertilizantes comerciais para o cultivo comercial e, também, fontes p.a. (pro-análise), com alto grau de pureza, destinadas especialmente em pesquisas básicas na área nutrição de plantas.

### **Água**

Em hidroponia comercial, pode ser utilizada água potável, enquanto em hidroponia científica, utiliza-se, em geral, a água destilada; entretanto, em alguns casos, é melhor a água deionizada (até 2 vezes), a exemplo de ensaios, cujo objetivo é induzir deficiência nutricional, especialmente de micronutrientes.

### **Ordem de adição dos nutrientes**

Para evitar reações de precipitação de fertilizantes (pouco solúveis) que tornaria indisponível para as plantas, é necessário seguir determinada ordem de adição dos nutrientes. Antes da adição dos fertilizantes (nutrientes), deve-se acertar o valor pH da água a padrões adequados (discutido no item subsequente).

- a) Adicionar os fertilizantes à base de macronutrientes sem cálcio, como fosfato de potássio, (nitrato de potássio e sulfato de magnésio);
- b) Sais de cálcio (nitrato de cálcio);
- c) Micronutrientes sem ferro, como fontes de fertilizantes à base de Mn, Zn, Cu, B e Mo;
- d) Fonte de ferro (Fe-EDTA ou outro);

Em seguida, efetuar imediatamente o ajuste do valor pH e fazer a determinação da CE (condutividade elétrica) (discutido no item subsequente).

### **Manutenção do pH adequado da solução nutritiva**

Quanto à questão do pH, tem-se:

- a) Calibrar o aparelho antes de cada medição;

b) Ajuste diário, visando a manter o valor pH da solução na faixa 5,5-6,5. E caso de valor pH acima desta faixa, adicionar “gotas” de um ácido a 0,1 M (HCl; HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ou, caso contrário, adicionar uma base a 0,1M (NaOH; KOH). Entretanto, o melhor ajuste do pH da solução é o manejo de fontes do nitrogênio (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) da solução nutritiva. Para isso, tem sido adotado parte do N na forma NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na proporção de 10-20% do N total. O uso da solução com N na forma de amônio e nitrato, poderá inicialmente diminuir o valor pH, até o momento que praticamente todo amônio da solução tivesse sido absorvido pela planta e na seqüência tem-se maior absorção de nitrato e aumento do valor pH (Silva et al., 2002). O manejo do pH da solução é importante, porque valores baixo (~4) afetam a integridade das membranas (H<sup>+</sup> afeta a permeabilidade das membranas) podendo haver perda de nutrientes já absorvidos e em valor alto (>6,5) pode haver problemas no gradiente eletroquímico e cotransporte próton/ânion pelas membranas, além de haver perda de compostos fenólicos e de eletrólitos das células. E indiretamente o pH elevado afeta reações químicas indesejadas na solução podendo levar a deficiências nutricionais nas plantas (Fe, Mn, B e P).

#### **Manutenção da CE adequada da solução nutritiva**

A condutividade de uma solução eletrolítica é a expressão numérica quantitativa da sua capacidade de transportar a corrente elétrica. Ela é definida como sendo o inverso da resistência elétrica de 1 cm cúbico do líquido a uma temperatura de 25°C. Convencionou-se que a condutividade elétrica é a unidade equivalente a 1 mhos = 1 Siemens = 10<sup>3</sup> mS = 10<sup>6</sup> μS (mS = miliSiemens; μS = microSiemens).

Normalmente, a CE da solução nutritiva varia de 1,5 a 4,0 mS/cm em função da solução nutritiva escolhida para a respectiva cultura. A CE obtida em uma solução é a soma da CE de todos os fertilizantes utilizados na formulação da solução nutritiva. Para Castellane & Araújo (1995) é obtido CE de 2,6 a 2,8 mS/cm. Como 1 mS/cm corresponde a 640 ppm de nutrientes, nota-se que o uso desta variável durante o cultivo da cultura, evitaria que a solução nutritiva apresentasse baixa concentração de nutrientes, o que poderia levar à deficiência nutricional. Normalmente, quando a condutividade elétrica é reduzida a um determinado nível da solução inicial (cerca de 30-50%), é recomendável substituí-la. Em cultivo comercial, pode-se trabalhar com a CE para o manejo da solução nutritiva da seguinte forma (Carmello & Rossi, 1997):

a) Adicionar-se, diariamente, uma quantidade de solução nova equivalente à quantidade de solução que foi reduzida no recipiente. Após 21 dias, renovar a solução nutritiva se a condutividade atingir 4 mS/cm.

b) Adicionar-se somente água, para repor a quantidade de solução evapotranspirada e acompanhar a condutividade, para quando ela estiver menor que 1 mS/cm, adicionar os sais para recompô-la ou trocá-la. Também 21 dias, renovar a solução nutritiva.

#### **Manutenção da pressão osmótica adequada da solução nutritiva**

A pressão osmótica da solução nutritiva deve estar na faixa de 0,5-1,0 atm, uma vez que valores altos podem indicar excesso de sais na solução, com danos sérios às raízes.

#### **Manutenção da temperatura adequada da solução nutritiva**

Para evitar aquecimento da solução nutritiva (>25-30°C), é importante evitar a incidência de luz na mesma, mantendo-a em local sombreado e ventilado. Salienta-se, ainda, que a incidência de luz na solução permite a proliferação de algas na solução.

#### **Manutenção da oxigenação da solução nutritiva**

É consenso que a oxigenação da solução nutritiva é obrigatória para manutenção de teor de O<sub>2</sub> adequado às raízes (~3 ppm de O<sub>2</sub>). Como o aumento da temperatura da solução nutritiva causa diminuição do teor de O<sub>2</sub> dissolvido, é importante evitar altas temperaturas. Este arejamento é próprio para cada sistema hidropônico, pois apenas a queda no retorno da solução nutritiva ao reservatório ou em caso de vasos isolados, a injeção de ar comprimido pode fornecer o oxigênio necessário às plantas.

## Capítulo 2. Absorção iônica radicular

### 2.1. Absorção iônica

Para estudar os fenômenos da absorção iônica radicular, inicialmente, é preciso entender os processos de **contato íon-raiz**. Em seguida, conhecer os **aspectos anatômicos da raiz**, das estruturas que os nutrientes devem percorrer, as quais podem constituir “barreiras” ou “canais livres” à passagem dos elementos. O **processo de absorção** propriamente dito é governado por mecanismos de transferências destes nutrientes, podendo ser de forma ativa (com gasto de energia) ou passiva (sem gasto de energia). Por fim, é importante, também, conhecer os **fatores externos (do meio) e internos (da planta)** que podem influenciar a absorção destes nutrientes pelos vegetais.

#### 2.1.1 Contato íon-raiz

Antes de ocorrer o processo de absorção dos nutrientes pelas raízes, é preciso ocorrer o contato íon-raiz, seja pelo movimento do íon na solução do solo da rizosfera (difusão ou fluxo de massa), seja pelo próprio crescimento da raiz que encontra o íon (interceptação radicular).

**a) Interceptação radicular:** a raiz ao desenvolver-se, encontra o elemento na solução do solo, na qual ele tem que estar para que possa ser absorvido. Normalmente, pode ser estimado como a quantidade de nutrientes existente num volume de solo (rizosférico) igual ao ocupado pelas raízes. Este valor da interceptação radicular é relativamente baixo porque o volume de raízes que ocupa a camada de 0-20 cm é, em geral, cerca de 1-2% do volume do solo.

**a) Fluxo de massa:** é o movimento do elemento da solução do solo, fase aquosa móvel, para próximo da raiz (rizosfera), à medida que a planta transpira. Isto acontece devido a uma ligação ininterrupta entre as moléculas que se evapora pela folha e a molécula da solução do solo; a quantidade do nutriente (ou íon) que pode entrar em contato com a raiz pelo transporte de fluxo de massa da solução. É calculada multiplicando-se o volume de água transpirada (ou absorvida) pela planta e a concentração do nutriente da solução.

**b) Difusão:** o nutriente caminha por distâncias curtas, dentro de uma fase aquosa estacionária, indo de uma região de maior concentração para outra de concentração menor, na superfície da raiz; o cálculo deste contato íon-raiz é feito pela diferença entre o total absorvido pela planta e a soma da interceptação radicular e fluxo de massa.

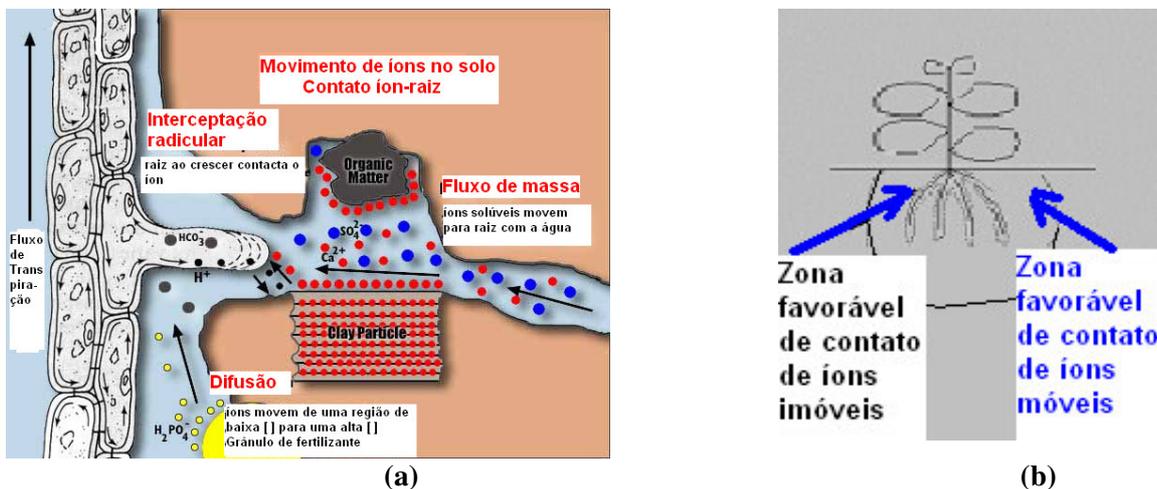
Os íons têm diferentes capacidades de caminamento no solo e/ou na água (Malavolta et al.,1997) (Tabela 9).

**Tabela 9.** Distância relativa percorrida pelo NPK na água e no solo (Malavolta et al.,1997).

Nutriente	Água	Solo
	$m^2 s^{-1}$	
$NO_3^-$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$10^{-10}$ a $10^{-11}$
$K^+$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$10^{-11}$ a $10^{-12}$
$H_2PO_4^-$	$0,9 \cdot 10^{-9}$	$10^{-12}$ a $10^{-15}$

Calcula-se que o  $NO_3^-$  se difunde 3 mm por dia; o  $K^+$  caminharia 0,9 mm, e o  $H_2PO_4^-$  alcançaria 0,13 mm.

Portanto, existem três maneiras de ocorrer o contato íon-raiz, interceptação radicular, difusão e fluxo de massa, que estão esquematizadas na Figura 9a.



**Figura 9.** Os elementos entram em contato com a raiz por interceptação radicular, fluxo de massa e difusão (a) e zona favorável da rizosfera para o contato de íons imóveis e móveis (b).

A contribuição relativa dos três processos de contato íon-raiz, no suprimento de nutrientes pelos vegetais, foi estudada utilizando como planta-teste o milho (Tabela 10).

Observa-se que o fluxo de massa é mais importante para o N, Ca, Mg, S e alguns micronutrientes (B, Cu, Fe e Mo), e a difusão é o principal meio de contato do P e K e os micros Mn e Zn do solo com as raízes.

Estes processos são importantes porque tem implicações na determinação da localização do fertilizante em relação à semente ou à planta, no sentido de garantir maior contato dos nutrientes com pêlos absorventes e conseqüentemente maior eficiência da adubação, conforme ilustra a Tabela 11. Assim, nota-se

que o nutriente que se move por difusão, por exemplo, deve ser localizado (próximo da raiz) de modo a garantir o maior contato com a raiz, pois, caso contrário, devido ao pequeno movimento, as necessidades da planta poderão não ser atendidas. Enquanto os nutrientes que apresentam maior mobilidade no solo, a exemplo do processo de fluxo de massa, têm a possibilidade de aplicação a distâncias maiores da planta em adubação à lanço ou em cobertura. Portanto, pode-se inferir que os nutrientes que caminham muito pouco no solo (imóveis) e os que tem maior mobilidade no solo (móveis) têm uma restrita e ampla zona favorável para que ocorra o contato íon-raiz, respectivamente (Figura 9b) com conseqüência para o local da adubação.

**Tabela 10.** Contribuição relativa da interceptação radicular, do fluxo de massa e da difusão de nutrientes para as raízes de milho num solo “barro limoso” (Barber, citado por Malavolta et al., 1997)

Nutriente	Absorção (kg ha <sup>-1</sup> )	Quantidade disponível (0-20 cm) (kg ha <sup>-1</sup> )	Extrato de saturação ppm	Quantidade fornecida (kg ha <sup>-1</sup> )		
				Interceptação	Fluxo de massa	Difusão
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	170	-	-	2	168	0
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	39	45	0,5	0,9	1,8	36,3
K <sup>+</sup>	135	190	10	3,8	35	92,2
Ca <sup>2+</sup>	23	3.300	50	66	175	0
Mg <sup>2+</sup>	28	800	30	16	105	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	20	-	-	1	19	0
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,07	1	0,20	0,02	0,70	0
Cu <sup>2+</sup>	0,16	0,6	0,10	0,01	0,35	0
Fe <sup>2+</sup>	0,80	6	0,15	0,1	0,53	0,17
Mn <sup>2+</sup>	0,23	6	0,015	0,1	0,05	0,08
MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,01	-	-	0,001	0,02	0
Zn <sup>2+</sup>	0,23	6	0,15	0,1	0,1	0,53

**Tabela 11.** Participação relativa entre os processos de contato e a localização de adubos.

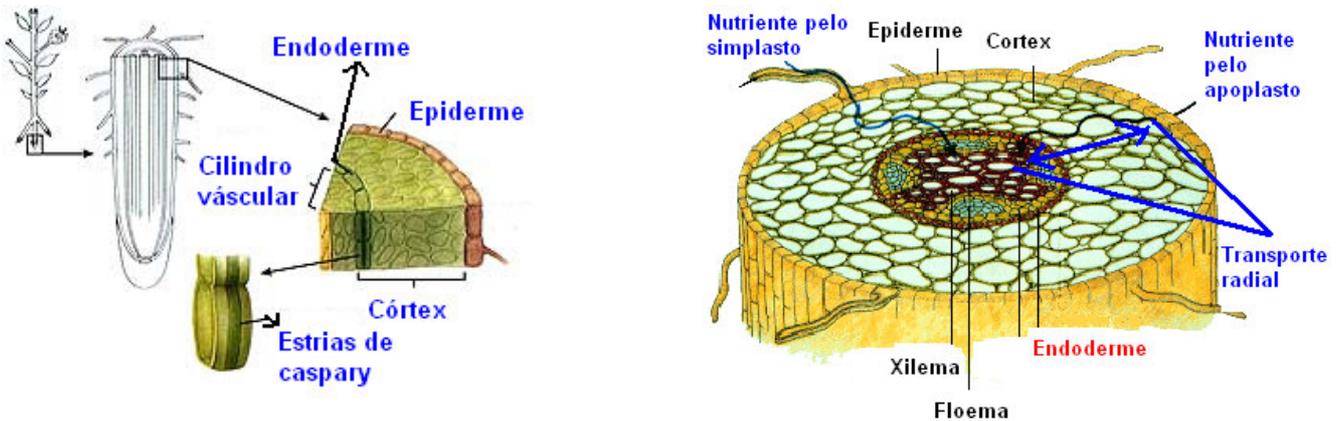
Elemento	Processo de contato			Modos de aplicação de adubos no solo
	Interceptação	Fluxo de massa	Difusão	
	% do total			
N	1	<b>99</b>	0	Área total/cobertura
P	2	5	<b>93</b>	Localizado/semeadura
K	3	27	<b>70</b>	Localizado/semeadura
Ca	27	<b>73</b>	0	Área total/pré-semeadura
Mg	13	<b>87</b>	0	Área total/ pré-semeadura
S	5	<b>95</b>	0	Área total/cobertura
B	3	<b>97</b>	0	Área total/cobertura
Cu	3	<b>97</b>	0	Área total/semeadura
Fe	13	<b>66</b>	21	Área total/semeadura
Mn	<b>43</b>	22	<b>35</b>	Localizado/semeadura
Mo	5	<b>95</b>	0	Área total/semeadura
Zn	20	20	<b>60</b>	Localizado/semeadura

Obs. Área total/cobertura – refere-se a aplicação em área total após ~ 30 dias da emergência da cultura. A época de aplicação pode variar em função da cultura, visando atender os períodos de maior exigência nutricional. Localizado/semeadura – refere-se a aplicação localizada no sulco de semeadura.

## 2.1.2. Aspectos anatômicos da raiz e os processos ativos e passivos da absorção

### a) Aspectos anatômicos da raiz

É importante conhecer alguns aspectos anatômicos da raiz. Para isso, será apresentado um corte transversal da raiz, indicando os tipos de células existentes (Figura 10).



**Figura 10.** Aspectos da anatomia da raiz a partir de um corte transversal, ilustrando o movimento do nutriente pelo simplasto (através das membranas das células) e apoplasto (espaço entre as células vegetais, constituído pela parede celular).

Observam-se os seguintes tipos de células: a) epiderme – camada geralmente única de células compactas com pelos absorventes; b) parênquima cortical – várias camadas de células com espaços entre elas; c) endoderme – camada única de células compactas cujas paredes radiais e transversais apresentam um reforço de suberina (= estrias de caspary) que bloqueia a passagem dos íons pelas paredes e espaços intercelulares; d) cilindro central – camada de células compactas que circundam os elementos condutores do floema e do xilema.

### b) Processos de absorção dos nutrientes pelas raízes

Imaginou-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 concentração (a solução externa) para outro de menor (o suco celular). Entretanto, quando se compararam as análises do suco celular com as do meio em que viviam diferentes espécies, verificou-se que, de modo geral, a concentração interna dos elementos era muito maior que aquela do meio externo e que havia certa seletividade na absorção dos elementos. Assim, o avanço das pesquisas definiu que a absorção de nutrientes é caracterizada por alguns fatores:

- Seletividade – é uma consequência da ação específica dos carregadores que atuam nas membranas no transporte de solutos para o citosol da célula; Assim, a absorção de íons é específica e seletiva; 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;
- Genótipos – existem diferenças entre espécies de plantas nas características de absorção.

Logo após do contato do nutriente com a raiz (discutido anteriormente), tem-se a absorção. Absorção de nutrientes pelas plantas é definida como a entrada de um elemento, na forma iônica ou molecular, no espaço intercelular ou, em qualquer região da célula viva da raiz, como as membranas (plasmalema). A primeira camada de células da raiz a ser vencida pelos nutrientes é a epiderme.

Assim, o processo de absorção propriamente dito ocorre em duas fases distintas: passiva e ativa.

a) **Fase passiva:** corresponde à entrada do nutriente nos espaços intercelulares, pela parede celular ou até parte externa da plasmalema (que é a membrana que envolve o citoplasma) (Figura 11). Nesta fase, o nutriente caminha a favor de um gradiente de concentração, ou seja, de uma região de maior concentração para uma de menor concentração, sendo um processo chamado “morro abaixo”, portanto, sem gasto de energia. Neste caso, fora da raiz, a concentração do nutriente é maior do que a concentração do mesmo nutriente nos espaços intercelulares, na parede celular e na superfície externa da plasmalema. Essas regiões da célula, delimitam o chamado *Espaço Livre Aparente* (ELA), composto dos macroporos, um espaço livre da água (ELágua) e dos microporos (Espaço livre de Donnan), por onde ocorre a troca de cátions e a repulsão dos ânions, visto que a superfície destes canais contém cargas negativas ( $R-COO^-$  das fibras da parede celular) que atrai os cátions e repele os ânions. Assim, plantas que contém maior quantidade de grupos carboxílicos ( $R-COO^-$ ) nas paredes celulares das células das raízes (ou seja maior CTC) podem ter maior reserva de cátions, que favorece sua subsequente absorção para o interior das células das raízes. Assim, a CTC da raiz pode ter reflexos na sensibilidade de genótipos à deficiência nutricional (micronutrientes).

Salienta-se, ainda, que a absorção passiva se dá por meio de diversos processos tais como: fluxo de massa, difusão, troca iônica e equilíbrio de Donnan. Esse mecanismo de absorção é rápido e reversível, ou seja, o nutriente já contido no ELA pode sair dele com certa facilidade.

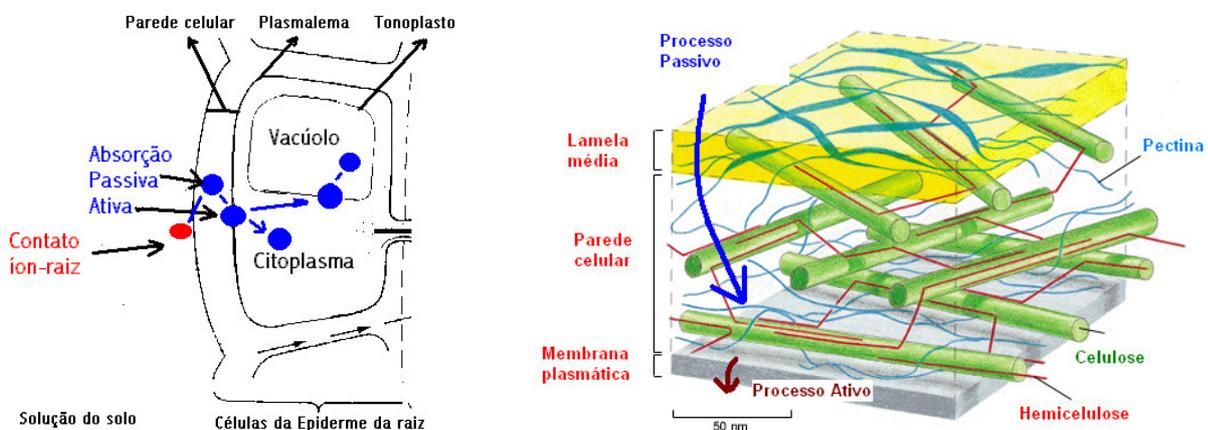
b) **Fase ativa:** corresponde à passagem dos nutrientes pela membrana plasmática (plasmalema) (Figura 11), atingindo o citoplasma e depois a membrana do vacúolo (tonoplasto) até o seu interior. Nesta fase, o caminhar do íon (nutriente) se dá contra um gradiente de concentração, ou seja, o nutriente vai de uma região de menor concentração para uma de maior. É o processo “morro acima” que exige gasto de energia metabólica. Esta fase corresponde à travessia da membrana citoplasmática (plasmalema) e do vacúolo (tonoplasto). As teorias defendidas para explicar o mecanismo ativo de absorção, não são ainda muito claras, mas é possível citar algumas principais tais como: a Teoria do Carregador, a Teoria de Lundengardh e a Teoria Quimiosmótica. Atualmente, a mais aceita a teoria do carregador, que se postula, que ocorre o “carregamento” do nutriente por um Carregador específico. A equação abaixo tenta esquematizar esta teoria:

$$Ne + R \leftrightarrow NR \leftrightarrow Ni + R'$$

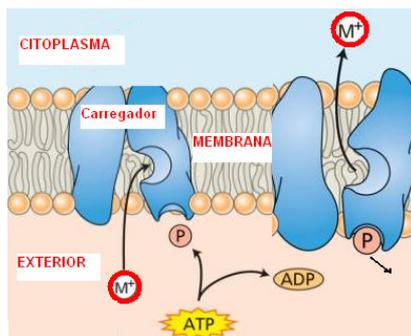
Onde: Ne= nutriente externo; Ni= nutriente interno; R= carregador

Cabe ressaltar que, nas membranas, as ATPases desdobram o ATP (Energia+ADP + P), liberando a energia para ativar o carregador. Com isso, a ATPase libera para o exterior H<sup>+</sup> e torna o citoplasma “negativo”, gerando situação favorável para o carregador transportar (por difusão facilitada) um cátion para interior da célula, voltando ao equilíbrio anterior. Simultaneamente, o ADP<sup>-</sup> reage com H<sub>2</sub>O formando OH<sup>-</sup> no citoplasma, de forma que o carregador troca OH<sup>-</sup> produzido por um ânion. Além disso, o gradiente de pH entre o citosol e a parede celular favorece diretamente a reabsorção de prótons para o citosol, podendo estar associado ao transporte simultâneo de ânions.

Assim, o sistema “bomba iônica” caracterizada pelo carregador presente nas membranas desencadeia a absorção ativa dos nutrientes (Figura 12). Os carregadores são proteínas que transporta os nutrientes pelas membranas, aproveitando o gradiente de potencial eletroquímico gerado pela atividade da ATP ase.



**Figura 11.** Esquema do contato íon-raiz e a absorção passiva pela parede celular e a ativa de um nutriente (M<sup>+</sup>) pelas membranas (a) e um detalhe da parede celular e membrana plasmática (b).



**Figura 12.** Esquema com detalhe da membrana plasmática, ilustrando o processo ativo de absorção de um nutriente ( $M^+$ ), por meio do carregador dependente do ATP.

Salienta-se que os têm-se genes múltiplos que codificam as ATPases do plasmalema e do tonoplasto. Canais que atuam na absorção do K foram os primeiros a ser caracterizados ao nível molecular. Os transportadores de metais pesados caem em quatro famílias de ATPases. Transportadores para fosfato e sulfato foram identificados. Os genes que codificam os canais para Ca ainda não foram codificados. O conhecimentos dos transportadores dos nutrientes pelas membranas através de estudos de biologia molecular, poderia auxiliar o melhoramento genético no sentido de seleção de genótipos com maior habilidade na absorção de nutrientes, com maior eficiência nutricional.

Alguns aspectos podem ser destacados quando se comparam as fases passiva e ativa da absorção (Tabela 12).

**Tabela 12.** Aspectos básicos que caracterizam as fases passiva e ativa durante o processo de absorção de nutrientes

Fase passiva	Fase ativa
1. Processo físico ou químico, ocorre em sistemas vivos ou não	1. processo metabólico, ocorre em célula viva.
2. Não está ligado à respiração e fosforilação	2. Está ligado a respiração e fosforilação
3. Não há gasto de energia	3. Há gasto de energia
4. Espontâneo	4. Não é espontâneo

O transporte dos nutrientes pelas membranas pode ocorrer também por canais protéicos integrais especializados no transporte seletivos de íons, cuja ação é modulada pela abertura e pelo fechamento do poro protéico. Na membrana, diversos fatores regulam o transporte de íons através desses canais, incluindo luz, hormônios específicos e concentração intracelular de  $Ca^{+2}$  (Satter & Moran, 1988). Os mesmos autores,

salientam, ainda, que este transporte é passivo, pois segue o gradiente de potencial eletroquímico, sendo mais rápido (1000 vezes ou mais) do que o transporte por carregadores.

Assim, a cinética de absorção de certos íons segue duas fases, uma característica das baixas concentrações e outra mais relacionada às altas concentrações. (Epstein, 1972). A cinética de absorção em baixas concentrações possui um Km muito baixo (o que indica alta afinidade do transportador) e a de altas concentrações possui Km alto e parece não mostrar saturação.

É oportuno salientar, que o movimento dos íons nas células das raízes até a endoderme, ocorre predominantemente pela via simplasto, visto que a presença dos “canais livres” (ELA) nesta região representa pequena fração do volume total da raiz (<10%).

Após os nutrientes (e a água) terem vencidos estas barreiras e atingido os vasos do xilema, os mesmos são movimentados devido à pressão da raiz (hipótese mais aceita) de forma passiva.

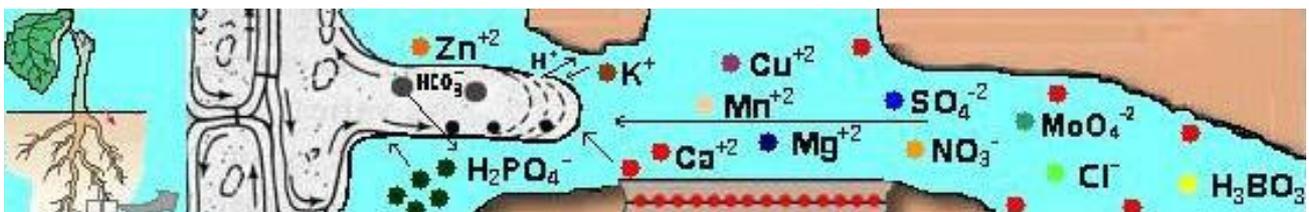
### 2.1.3. Fatores internos e externos que afetam a absorção de nutrientes pela raiz

A absorção iônica é influenciada por fatores do meio, isto é, externos (meio) e por fatores internos, ligados à própria planta, podendo modificar a velocidade de absorção, aumentando-a ou diminuindo-a. Estes fatores, portanto, podem alterar a eficiência de absorção dos nutrientes (EA) pelas plantas, ou seja, a capacidade da planta na absorção de nutrientes por unidade de raiz. É calculado pela seguinte fórmula:  $EA = (\text{conteúdo total do nutriente na planta}) / (\text{matéria seca de raízes})$  (Swiader et al., 1994).

#### a) Fatores externos

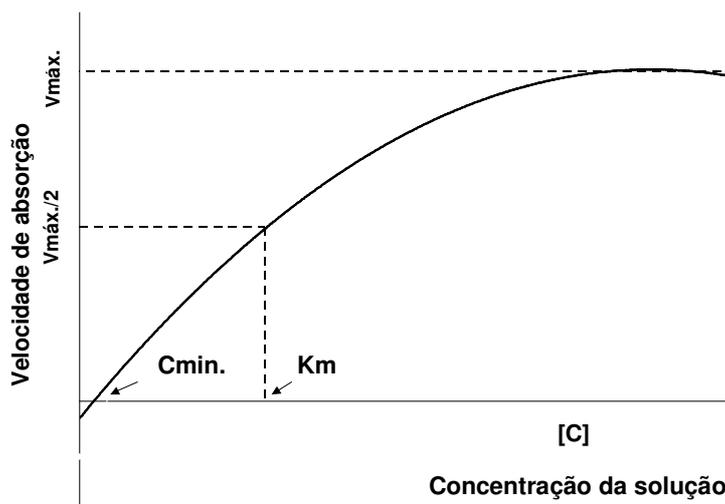
##### Disponibilidade:

A primeira condição para que o nutriente seja absorvido refere-se à necessidade de este estar na forma disponível à planta, ou seja, a forma química que a planta “reconhece” como um nutriente. Por exemplo: boro ( $H_3BO_3$ ); cobre ( $Cu^{2+}$ ); molibdênio ( $MoO_4^{2-}$ ) etc., conforme mostrado na Figura 13.



**Figura 13.** Formas químicas dos nutrientes na solução do solo passível de ser absorvido.

Desse modo, para que o nutriente seja absorvido, é preciso estar na forma disponível na solução do solo. Assim, os fatores que governam a passagem dos nutrientes da fase sólida para a fase líquida também afetam a futura absorção do mesmo. Dentro de certos limites, o aumento na disponibilidade, medido pelo incremento na concentração do nutriente na solução do solo, resulta em aumento na quantidade absorvida por unidade de tempo (Figura 14). Dentre estes fatores que afetam a disponibilidade de nutrientes na solução do solo têm-se: pH, aeração, umidade, matéria orgânica, temperatura, presença de outros íons, entre outros.

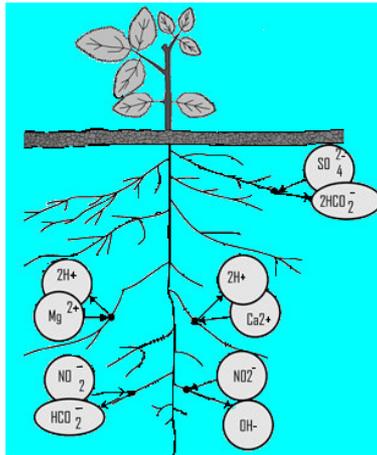


**Figura 14.** Relação da concentração iônica da solução e a velocidade de absorção, conforme a equação de Michaelis-Menten. (Km: concentração do elemento que garante 1/2 de V<sub>máx.</sub> = medida da afinidade do nutriente pelo carregador; C<sub>min.</sub> = concentração inicial mínima em que não há absorção).

Ressalta-se, que das variáveis citadas, a mais importante e estudada refere-se ao valor pH.

**pH “efeito direto”** – no processo de absorção, pode existir a competição entre o H<sup>+</sup> e os outros cátions e, do OH<sup>-</sup> com os outros ânions, pelos mesmos sítios dos carregadores na membrana. Assim, pode-se afirmar que em solo ácido (pH baixo) ou alcalino (pH alto) tem-se diminuição da absorção de cátions ou de ânions, respectivamente.

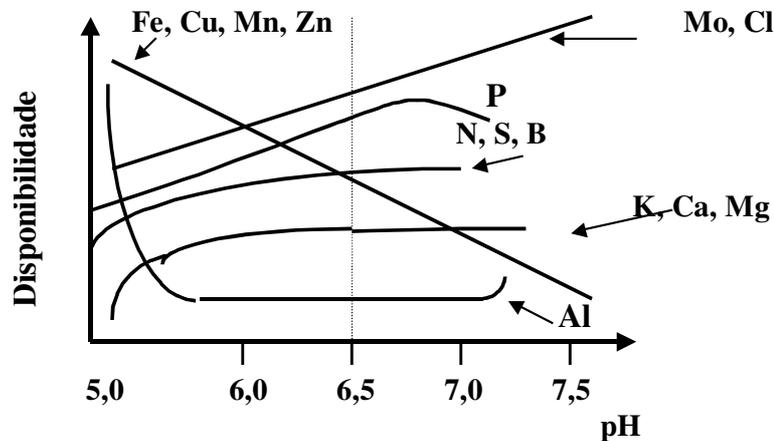
Em solos tropicais predomina a reação ácida, portanto, o risco de deficiência nutricional de macronutrientes como K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> mostram-se significativos. São vários fatores que levam a acidez do solo como a precipitação atmosférica, lixiviação de bases, adubação nitrogenada. Além destes, a própria planta poderá acidificar o meio, visto que toda vez que a planta absorve um cátion libera no meio um H<sup>+</sup> ou se for um ânion libera no meio OH<sup>-</sup>, este artifício a planta utiliza para manter o equilíbrio cátion-ânion no meio (Figura 15).



**Figura 15.** Absorção de nutrientes pelas plantas ilustrando o processo de troca de cátions e ânions.

Portanto, em solo ácido, a absorção mesmo pequena de cátion tende a agravar o problema de acidez devido a este mecanismo da planta (liberação de  $H^+$  no meio).

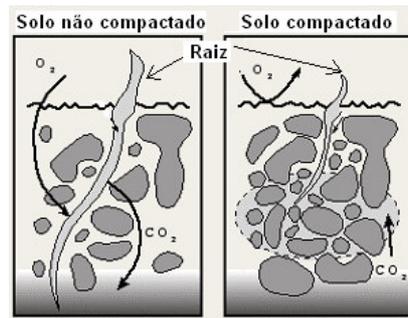
**pH “efeito indireto”** – caracterizado pelo fato de que a maior disponibilidade aumenta a concentração do elemento na solução do solo e, portanto, ocorre maior absorção. Nos valores pH (em água) na faixa de 5,5 a 6,5, a disponibilidade de alguns nutrientes é máxima (macronutrientes) e não-limitante para outros (micronutrientes) (Figura 16).



**Figura 16** Relação entre o valor pH do solo e a disponibilidade de nutrientes.

**Aeração** – é importante o oxigênio durante o processo da absorção ativa, que depende da energia metabólica (ATP) originada na respiração. Assim, solos compactados impedem o fluxo de  $O_2$ , comparado ao solo não-compactado, conforme ilustra o esquema abaixo (Figura 17).

Além disso, a aeração pode aumentar a disponibilidade dos nutrientes no solo, devido à atividade da microbiota aeróbica do solo, que oxida  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{S}^{2-}$  a  $\text{SO}_4^{2-}$ , a partir do  $\text{O}_2$ .



**Figura 17** Fluxo de  $\text{O}_2$  em solo não-compactado e compactado.

**Temperatura** – na faixa de 0 a  $30^\circ\text{C}$ , a absorção cresce de modo praticamente linear, com a elevação da temperatura. Isto se explica pelo fato de que dentro de certos limites, há um aumento da atividade metabólica da planta, principalmente pela intensidade respiratória.

**Umidade** – além de influenciar a disponibilidade de elementos no solo, a umidade afeta, também, o processo de absorção, visto ser a água o veículo natural de entrada dos nutrientes. Assim, a precipitação pluviométrica ou níveis de irrigação, utilizados na área agrícola pode influenciar a absorção dos nutrientes pelas culturas. Não existe, porém, uma relação muito estreita entre a velocidade de absorção da água e dos íons. O  $\text{K}^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , por exemplo, são absorvidos muito mais rapidamente em relação à água; o contrário se observa para o  $\text{Ca}^{+2}$  e condições de absorção semelhantes à água são obtidas com o  $\text{Mg}^{+2}$ .

**Elemento** – a velocidade de absorção depende, em parte, do elemento considerado, obedecendo à seguinte ordem decrescente:

**Ânions:**  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$  ;

**Cátions:**  $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$

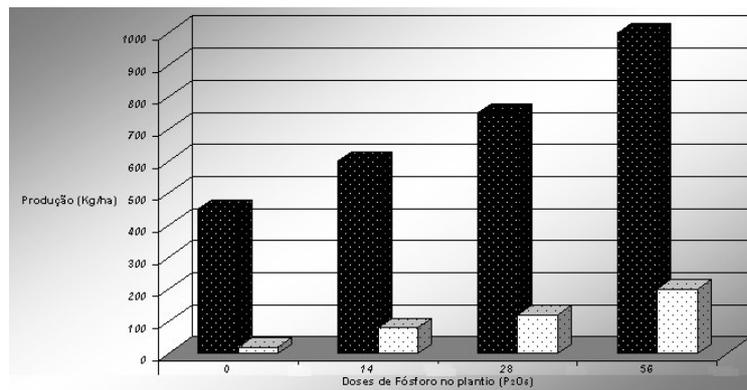
É pertinente, salientar que normalmente os solutos hidrofóbicos movimenta-se mais rapidamente pelas membranas em taxas proporcionais a sua solubilidade em lipídeos. Portanto, os solutos mais hidrofóbicos movimenta-se mais que os hidrofílicos. Já moléculas hidrofílicas e íons com similar solubilidade em lipídios penetram em taxas proporcionais ao tamanho do íon hidratado. Analogamente, os cátions ou ânions divalente são mais absorvidos que os trivalentes.

**Outros íons** – a absorção de um dado elemento pode ser influenciada pela presença de outro, caracterizando a interação entre nutrientes, que será abordada oportunamente, em um capítulo específico.

**Micorrizas** - as micorrizas aumentam a superfície de exposição das raízes e, com isso, cresce a capacidade de absorção dos elementos, particularmente a do P que, geralmente, só se manifesta quando é baixa a concentração deste elemento na solução do solo. Na Tabela 13, a inoculação das mudas de café com fungo micorrízicos aumentou naturalmente o crescimento, e esse efeito não foi compensado com o aumento do suprimento de P às plantas; O efeito do fungo micorrízico no crescimento do cafeeiro refletiu, também, na produção desta cultura (Figura 18).

**Tabela 13.** Matéria seca de mudas de cafeeiro (g/planta) inoculadas ou não com o fungo *Gigaspora margarita*. (Lopes et al., 1983)

P aplicado (mg kg <sup>-1</sup> de solo)	Inoculação	
	Não	Sim
0	0,60	2,17
16	0,47	4,33
32	0,45	3,74
65	0,40	5,90
130	0,51	6,30



**Figura 18.** Efeito da inoculação de fungo micorrízico na altura e na produção do cafeeiro (a) (Lopes et al., 1983) e no volume de raízes de plantas (gramíneas) micorrizadas (b).

## b) Fatores Internos

### Potencial genético

O potencial genético da planta pode determinar uma maior facilidade ou não na absorção de um determinado elemento. Assim, existem espécies vegetais e/ou variedades que absorvem e concentram mais determinados nutrientes enquanto outros são ineficientes na absorção de outros elementos. Desse modo, o processo de absorção iônica está sob controle genético. As diferenças podem se manifestar de diversas

maneiras: nos valores e parâmetros de  $K_m$ ,  $V$  e  $[M]_{min}$ ; na capacidade de solubilizar elementos na rizosfera, mediante excreções radiculares; na mudança de valência do ferro ( $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$ ), que aumenta a sua absorção.

### Estado iônico interno

A planta saturada em íons absorve menos que outra planta que tenha poucos íons. Isso ocorre, devido ao fato ter atingido a  $V_{max}$  e  $I_{max}$ , que é o limite máximo da absorção de um dado nutriente.

As plantas ligeiramente deficientes têm velocidade de absorção maior que as plantas bem-nutridas. Neste sentido, Calvache et al. (1994), estudaram a absorção de  $^{32}P$  da solução pelas raízes destacadas do arroz. Pelos resultados, nas raízes das plantas deficientes em P (0,0 mMP) a absorção de  $^{32}P$  foi 12 vezes maior que nas raízes das plantas não deficientes (0,5 e 2,0 mM  $P.l^{-1}$ ).

Se a deficiência for muito acentuada, a velocidade de absorção diminui, pois ocorrem desarranjos metabólicos irreversíveis.

### Teor de carboidratos

O teor de carboidrato da planta determina o nível metabólico da mesma e, em função de essas substâncias constituírem o principal substrato respiratório e a conseqüente produção de energia, quanto maior o nível dessas reservas, maior será a absorção radicular.

### Intensidade transpiratória

O efeito da transpiração é indireto:

A corrente transpiratória, que no xilema conduz o nutriente para a parte aérea, pode aumentar a tensão, “puxando” os elementos contidos nos espaços intercelulares e na parede celular das células da raiz.

Havendo maior transpiração, é favorecido o gradiente de umidade no solo, o que aumenta o fluxo de massa para a raiz.

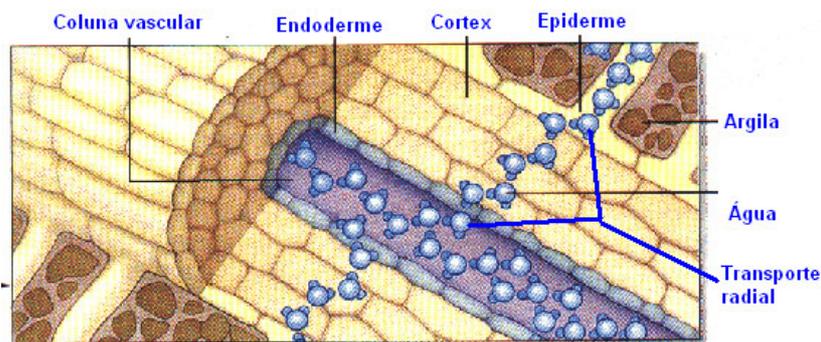
### Morfologia das raízes

As plantas com raízes bem-desenvolvidas, mais finas, bem-distribuídas, com maior proporção de pêlos absorventes, absorvem mais, especialmente elementos cujo contato com a raiz se faz por difusão. Assim, para avaliar a eficiência de absorção de nutrientes pelas plantas tem sido muito utilizado parâmetros morfológicos da raiz, destacando-se a área e o comprimento das raízes (Tachibana & Ohta, 1983). Como a absorção de nutrientes depende, entre outros fatores, da morfologia da raiz e da concentração do nutriente na solução do solo, e sendo este último limitante em regiões tropicais, coloca os parâmetros de raiz com papel

relevante no processo de absorção dos nutrientes. Diante disso, Barber (1995), desenvolveu um modelo matemático envolvendo várias variáveis do solo e da planta que poderia explicar e/ou eleger os parâmetros que mais afetaria absorção dos nutrientes pelas plantas. Por exemplo em soja, os fatores importantes para prever a absorção do potássio seria taxa de crescimento radicular e o raio da raiz, e em seguida outros fatores (concentração do K inicial na solução do solo; o poder tampão e o coeficiente de difusão do nutriente no solo).

## 2.2. Transporte

Após o nutriente ser absorvido pelas raízes por meio das células da epiderme, o mesmo sofrerá o transporte, definido como movimento do nutriente do local de absorção para outro local qualquer. Têm-se dois tipos de transporte dos nutrientes nas plantas, o radial (da epiderme até o xilema) e o de longa distância (do xilema até a parte aérea). O transporte radial compreende o movimento do nutriente da célula da epiderme até os vasos do xilema, pode ocorrer por dois caminhos: via apoplasto e/ou simplasto (Figura 19). Pela via apoplasto, os nutrientes podem percorrer os espaços intercelulares ou deslocar-se pelas paredes celulares, de uma célula para outra até chegar à endoderme, que a partir daí é impedida pelas estrias de caspary. Na via simplasto os nutrientes têm caminhamento pelo interior das células até a endoderme e mais para dentro pode também ser feito por meio de comunicações citoplasmáticas entre uma célula e outra (plasmodesma), sendo este caminho obrigatório além da endoderme (Malavolta, 1980).



**Figura 19.** Corte longitudinal da raiz ilustrando o transporte radial de água e nutrientes por via simplasto até coluna vascular (xilema).

E após o nutriente ter atingido o xilema, tem-se o transporte à longa distância até a parte aérea, que ocorre pelo processo totalmente passivo, para todos os nutrientes. Com a morte das células do xilema, formam-se tubos longos livres, permitindo o transporte da solução de nutrientes até a parte aérea.

Salienta-se, ainda, que a eficiência de transporte/translocação (ET) dos nutrientes pelas plantas pode variar em função da espécie vegetal e do nutriente. Conforme dito, anteriormente, ET pode ser calculada pela fórmula:  $ET = (\text{conteúdo do nutriente na parte aérea}) / (\text{conteúdo total do nutriente na planta}) \times 100$  (Li et al., 1991).

Estudos sobre a eficiência de transporte entre cultivares podem ser importantes para obtenção de plantas mais produtivas e com qualidade. Além disso, observou-se que na cultura do arroz, correlação positiva entre a eficiência de transporte e o teor de proteína no grão (Samonte et al., 2006).

### 2.3 Redistribuição

O termo redistribuição refere-se à transferência do nutriente de um órgão ou região de residência para outro ou outra, em forma igual ou diferente da absorvida; exemplo:

De uma folha qualquer para o fruto em desenvolvimento;

de uma folha velha para uma folha mais nova;

da casca para uma folha mais nova.

A redistribuição de um nutriente na planta é processo secundário e se refere a translocação do mesmo desde os locais onde foram depositados pelo movimento da água no xilema (Cerdeira et al., 1982) até atingir outros órgãos via vasos do floema. Para isto, os solutos passam por três sistemas: difusão no simplasto e espaço livre; transporte ativo através da membrana para o floema; fluxo passivo pelos tubos crivados (Figura 20).

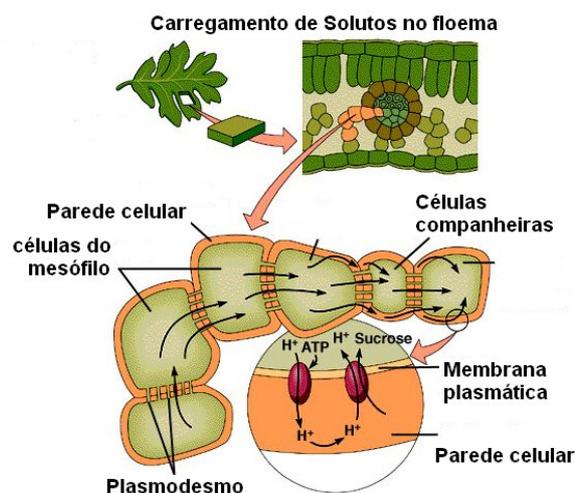


Figura 20. Movimento de solutos (açúcar e nutrientes) pelo floema.

Deste modo, os nutrientes com alta mobilidade na planta, apresentam alta concentração deste nutriente no floema. Uma vez que a imobilidade no floema é causado presumivelmente pela incapacidade desses elementos de entrar nos tubos crivados.

Assim, a mobilidade dos nutrientes (redistribuição pelos órgãos no floema) nas plantas varia de elemento para elemento, ou seja, as funções que o nutriente exerce na planta determina sua mobilidade, e também sofre interferências do meio de cultivo e da espécie/cultivar. Inicialmente, a mobilidade dos nutrientes, foi classificados por Marschner (1986) como móveis, parcialmente móveis e até imóveis, e em seguida houve novas alterações na classificação (Tabela 14). Nota-se, que o N, P, K, Mg e Cl são considerados móveis por todos os autores; entretanto, para o S existe divergências, embora nas culturas, as deficiências visuais ocorrem em folhas novas. Assim, as pesquisas recentes, indicaram nova classificação de mobilidade “variável ou condicional”, uma vez que a espécie da planta e mesmo o estado nutricional interno pode alterar a dinâmica do nutriente entre os órgãos das plantas. Para a maioria das culturas os micronutrientes apresentam mobilidade restrita, a exemplo do Zn e B. Entretanto, estudos indicam que o Zn pode ter mobilidade no floema, a exemplo da cultura do trigo (Haslett et al., 2001). E outros trabalhos, utilizando como planta teste a macieira, verificou-se que ocorre a translocação de B em quantidades significativas na forma de um complexos orgânicos (B-itóis) móvel na seiva do floema (Hu & Brown, 1997).

**Tabela 14.** Classificação da mobilidade comparada dos nutrientes nas plantas.

Fonte	Classificação de mobilidade		
<b>Marschner (1986)</b>	<b>Móveis</b> N, P, K, Mg, Cl	<b>Parcialmente/pouco móveis</b> S, Zn, Cu, Mn, Fe, Mo	<b>Imóveis</b> B, Ca
<b>Marschner (1995)</b>	<b>Alta</b> N, P, K, Mg, S, Cl	<b>Intermediária</b> Fe, Zn, Cu, B, Mo	<b>Baixa</b> Ca, Mn
<b>Malavolta et al. (1997)</b>	<b>Móveis</b> N, P, K, Mg, Cl, Mo	<b>Pouco móveis</b> S, Cu, Fe, Mn, Zn	<b>Imóveis</b> Ca, B
<b>Welch (1999)</b>	<b>Móveis</b> N, P, K, Mg, S, Cl	<b>Variável</b> Fe, Zn, Cu, Mo, (Ni e Co)	<b>Condicional</b> Ca, B, Mn

De toda a forma, pode-se inferir que para aqueles nutrientes imóveis no floema, a aplicação foliar pode não ser a medida mais satisfatória de fornecimento do nutriente à planta, sendo a aplicação no solo, a mais vantajosa. Entretanto, em algumas situações, devido à baixa transpiração de frutos, a absorção radicular pode não ser suficiente para suprir estes frutos, assim aplicações localizadas têm sido recomendadas, a exemplo do Ca em tomateiro (fruto) para prevenir podridão apical, e também em maçã (bitter pit).

Ressalta-se que o aspecto da mobilidade de cada nutriente na planta será abordado com mais detalhes nos próximos capítulos.

Uma consequência prática importante de redistribuição, em condições não-caracterizadas por falta de suprimento, é o fato de que parte da necessidade da planta podem serem satisfeitas por esse movimento – desde que os órgãos mais velhos acumulem quantidade suficiente. Neste sentido, Paredes & Primo-Millo (1988) relataram que parte da necessidade dos novos órgãos da laranjeira são satisfeitas pela mobilização das reservas (Tabela 15). Observa-se que os nutrientes contidos nos órgãos de reserva atendem a parte do consumo dos órgãos novos de N, P e K, em 25-32; 12-17 e 22-29%, respectivamente.

**Tabela 15.** Necessidades nutricionais da laranjeira (Paredes & Primo-Millo, 1988)

Fase/idade	Massa seca (planta)	Massa fresca (frutos)	Consumo anual para novos órgãos (C)			Coberto pelas reservas (R)			Necessidades anuais (NA) <sup>(1)</sup>		
	kg	kg	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Mudas (2 anos)	1,2	-	6,8	0,8	3,6	25	12	22	5,1	0,7	2,8
Formação (6 anos)	32	28	210	18	121	32	16	28	142	15	87
Produção(12 anos)	102	120	667	53	347	32	17	29	453	44	246

<sup>(1)</sup> NA= C - (Cx R/100)

Em culturas anuais, a taxa de redistribuição dos nutrientes na fase reprodutiva pode ser fator de produção, pois satisfaz parte significativa da exigência da cultura. Em trigo, observou-se correlação entre a produção e redistribuição do nitrogênio da parte vegetativa para o grão (Xu et al.,2005).

A redistribuição pode ser afetado pelo nutriente e o estado nutricional das plantas. Neste sentido, Boaretto (2006) observou em plantas jovens de citrus, que quando estava bem nutrida em boro, cerca de 40% do micronutriente presente nos órgãos novos foi proveniente das reservas da planta, mas quando a planta estava deficiente, apenas 20% do B presente nos órgãos novos foi proveniente da reserva da planta. Segundo autor, possivelmente esse fato ocorreu porque as plantas cultivadas em solução deficiente do nutriente apresentava-se nas partes mais velha da planta principalmente em formas insolúveis, como constituinte de um composto orgânico (parede celular). Enquanto que as plantas desenvolvendo em solução nutritiva adequada, maior seria a quantidade do nutriente em formas solúveis em água (localizado na região apoplástica na forma de ácido bórico).

Malavolta (2005) relatou um decréscimo quadrático na utilização de N e K de órgãos de reservas durante a frutificação em função do teor foliar destes nutrientes. Assim, em plantas bem nutridas de N e K a redistribuição é baixa, e a exigência dos frutos podem ser satisfeito com as reservas do meio e não da própria planta.

Portanto, na seiva do floema pode ser transportados em maior quantidade os sacarídeos, os aminoácidos e os minerais. Além, destes tem-se: proteínas (~200); quase todos fito-hormônios vegetais (auxina; giberelinas; citocianinas; ácido abscísico); moléculas de RNA; compostos do metabolismo secundário, e até compostos químicos como inseticidas, fungicidas e herbicidas (Marenco & Lopes, 2005).

De acordo, com Shelp (1988), a razão da concentração de determinado nutriente entre as folhas novas e as folhas velhas evidencia se o mesmo é redistribuído via floema ou não. Quando a razão é muito menor que 1, por exemplo 0,5, indica que o nutriente não é redistribuído pelo floema, portanto imóvel e quando é maior que 1, por exemplo 1,5, indica que o nutriente é redistribuído via floema.

Salienta-se que esta técnica é apenas uma indicação de mobilidade, não sendo um método conclusivo, como o método direto pelo uso do nutriente “marcado”.

## Capítulo 3 ABSORÇÃO IÔNICA FOLIAR

### 3.1 Introdução

Atualmente, é aceito que a vida vegetal teve seu início na água. Neste *habitat*, onde hoje vive ainda a maioria dos vegetais, as plantas tinham à sua disposição todos os fatores necessários. Com a adaptação das plantas fora da água, por meio da evolução, as partes da planta se especializaram e passaram a executar determinadas funções. As raízes se especializaram em fixação e absorção de nutrientes, as folhas em fotossíntese e respiração e o caule em transporte de solutos, ligando as raízes às folhas. Entretanto, as partes aéreas não perderam a capacidade de absorver nutrientes.

Em um breve histórico da adubação foliar temos:

1844 - Relatos de aplicação de Fe em videira;

1874 - aplicação de chorume diluído em água em plantas de jardim na Alemanha;

1940-45 - grande impulso na absorção iônica devido a sobras de radioisótopos;

1945 - Início de pesquisas com adubação foliar no Brasil, pelo IAC e pela ESALQ;

1960-70 - grande número de firmas vendendo produtos para aplicação foliar, muitas vezes prometendo substituir a adubação do solo.

### 3.2 Aspectos anatômicos da folha e os processos ativos e passivos de absorção

O contato entre o nutriente e a folha é feito por meio da adubação foliar principalmente. Na adubação foliar, aplicam-se os nutrientes em solução aquosa e estes necessitam entrar na célula (citoplasma, vacúolo, organelas) para aí desempenharem suas funções. Uma vez que um nutriente é considerado absorvido quando está dentro da célula. Para isso, há duas barreiras a serem vencidas, a primeira é a cutícula/epiderme; a segunda são as membranas: plasmalema e tonoplasto.

A epiderme e a cutícula revestem a página superior e inferior das folhas, sendo a cutícula, que é a sua parte mais externa, de natureza química complexa, formada por ceras, cutina, pectina e celulose. É permeável à água. É a epiderme que confere as propriedades de molhamento e hidrofília.

A absorção foliar, tal como a radicular, compreende uma fase passiva (penetração cuticular) e uma ativa (absorção celular).

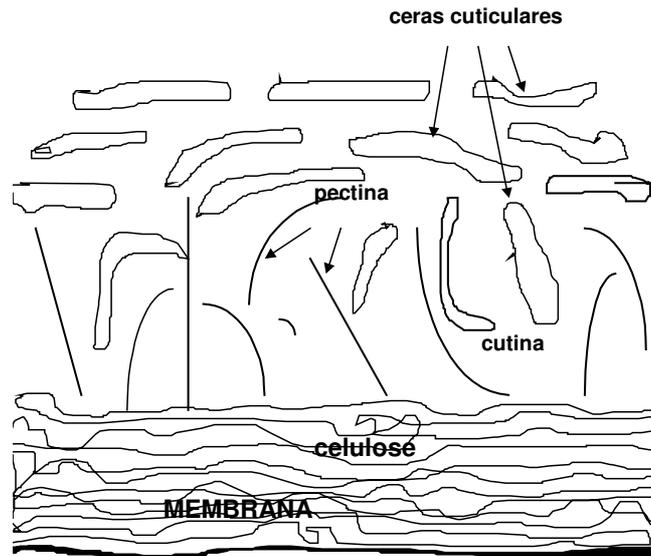
a) **Passiva** – consiste num processo não-metabólico, em que o nutriente aplicado à superfície foliar atravessa a cutícula superior ou inferior (Figura 20) acupando o ELA (Espaço Livre Aparente), formado pela parede celular, espaços intercelulares e superfície externa do plasmalema (Figura 21a).

Seria a entrada do nutriente no apoplasto foliar. A ordem decrescente de hidrofília é: pectina > cutina > ceras cuticulares. Nota-se que, devido à sua estrutura na forma de “escamas” imbricadas, e não-contínua como antes se pensava, existe algum espaço por onde é possível a passagem de soluções.

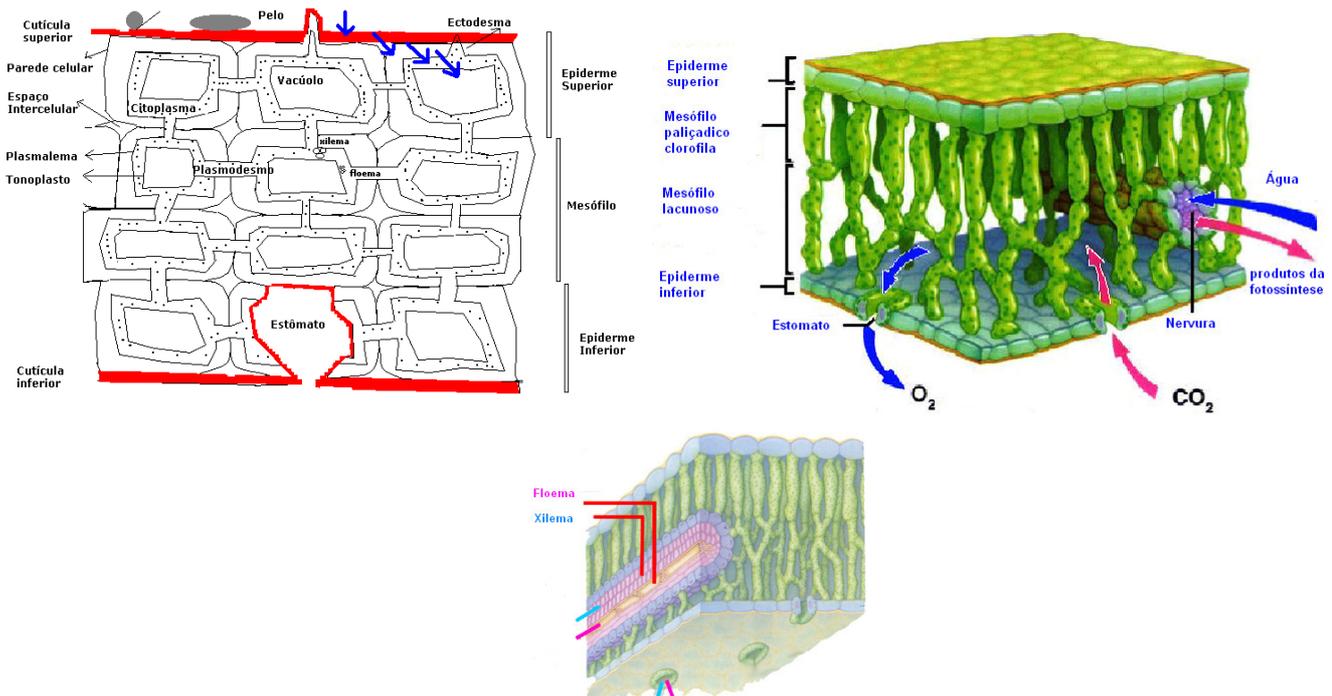
É oportuno salientar, ainda, que algumas substâncias, quando aplicadas à superfície da folha, são capazes de desfazer algumas ligações químicas existentes entre as unidades da estrutura cerosa da cutícula. O rompimento dessas ligações resulta em algumas aberturas na cutícula o que facilita a penetração de soluções. Esse fenômeno é conhecido como **Difusão Facilitada** e um exemplo de substância capaz de promover essas alterações é a uréia e por essa razão, esta é frequentemente empregada em pulverização foliar. Assim, a uréia tem se destacado como aditivo por aumentar a velocidade de absorção de cátions e ânions (Freire et al., 1981).

b) **Ativa** – Depois de vencida a cutícula, o nutriente é efetivamente absorvido, passando pelas membranas (plasmalema e/ou tonoplasto) das células da epiderme e do mesófilo. Assim é atingido o simplasto, podendo ser metabolizado ou transportado entre células por meio de projeções citoplasmáticas “plasmodesmos”, atingindo o floema e assim tem-se o transporte à longa distância (Figura 21b). Entretanto, diferentemente da raiz, na folha existe a possibilidade do carregamento do floema a partir do apoplasto. Ressalta-se que esta fase constitui-se num processo metabólico lento, dá-se contra um gradiente de concentração e exige o fornecimento de energia (ATP). Seria a ocupação do simplasto foliar. A absorção ativa dos nutrientes é moderada por um carregador específico.

(a)



(b)



**Figura 21.** Estrutura cuticular (Fonte: Hess, 1985) (a) e esquema da anatomia foliar a partir de um corte transversal da lâmina e um detalhe da nervura (b).

### 3.3 Fatores externos e internos que afetam a absorção de nutrientes pelas folhas

A exemplo do que foi visto na absorção radicular, a absorção foliar é também influenciada por diversos fatores sejam externos (ambiente), sejam internos (planta).

#### a) Fatores externos

Entre os fatores externos que influenciam a absorção foliar, são considerados: o ângulo de contato da solução e a folha, a temperatura e umidade, concentração e composição da solução e a luz.

O **ângulo de contato** entre a solução e a superfície foliar diz respeito ao maior ou menor molhamento da folha pela solução. Assim, quanto mais espalhada for a gota da solução, maior será o contato dessa com a superfície foliar e, portanto, maior será a possibilidade de absorção da mesma.

A **temperatura e umidade** do ambiente determinam a velocidade de secamento da solução aplicada à superfície foliar. Dessa forma, quando se têm altas temperaturas ou baixa umidade relativa do ar, a evaporação da solução é facilitada, o que concorre para uma menor permanência da mesma na superfície foliar e, conseqüentemente, diminuindo a possibilidade de absorção.

A **concentração da solução** a ser aplicada deve levar em conta a possibilidade de sua evaporação, podendo, portanto, a mesma se tornar muito concentrada a ponto de causar danos à folha. Assim, ao preparar-se uma solução, é necessário que antes da sua aplicação sejam consideradas as reais condições de evaporação da mesma.

A **composição da solução** é outro aspecto que deve ser considerado, pois cada elemento químico nela contido apresenta uma velocidade de absorção (Tabela 16) e que, portanto, têm-se nutrientes com absorção (50% do nutriente aplicado na folha) relativamente rápida como o N (0,5 a 36 h) e outros muito lentos como Fe e Mo (até 20 dias). Observa-se, uma variação do tempo de absorção em cada nutriente, tendo em vista ser dados obtidos em diferentes condições experimentais. Pesquisas recentes, a exemplo do S está de acordo com os dados apresentados na Tabela 16, ou seja, cerca de 33% do enxofre aplicado ao primeiro trifólio de feijoeiro foi absorvido no período de sete dias (Oliveira et al., 1995). Com relação ao B (em citrus), observou-se que a maior eficiência de absorção ocorreu depois de 16 horas da pulverização (Boaretto, 2006).

Há diferenças na absorção foliar em função da natureza química do íon (cátions ou ânions) e mesmo pelo íon acompanhante. Com relação a natureza química do íon, observa-se que os poros da cutícula contêm cargas negativas (ácidos poligalacturônicos), e isto implica em maior absorção de cátions em relação aos ânions que sofre uma repulsão. Assim, a taxa de absorção de  $\text{NH}_4^+$  é maior do que a de  $\text{NO}_3^-$ . Com relação ao íon acompanhante, estudos indicam que o Mg aplicado em folhas de macieira, tem maior absorção quando o íon acompanhante está na forma de cloreto comparado a nitrato ou sulfato, devido à variação na solubilidade e na higroscopicidade destes tipos de sais (Allen, 1960).

**Tabela 16.** Velocidade de absorção de nutrientes aplicados as folhas (Malavolta, 1980).

Nutriente	Tempo para 50% da absorção total
<b>N</b> - Uréia ( $\text{CO-NH}_2$ ) <sub>2</sub>	0,5 a 36 h.
<b>P</b> - $\text{H}_2\text{PO}_4^-$	1 a 15 dias
<b>K</b> - $\text{K}^+$	1 a 4 dias
<b>Ca</b> - $\text{Ca}^{2+}$	10 a 96 h.
<b>Mg</b> - $\text{Mg}^{2+}$	10 a 24 h.
<b>S</b> - $\text{SO}_4^{2-}$	5 a 10 dias
<b>Cl</b> - $\text{Cl}^-$	1 a 4 dias
<b>Fe</b> - Fe-EDTA	10 a 20 dias
<b>Mn</b> - $\text{Mn}^{2+}$	1 a 2 dias
<b>Mo</b> - $\text{MoO}_4^{2-}$	10 a 20 dias
<b>Zn</b> - $\text{Zn}^{2+}$	1 a 2 dias

Portanto, cada nutriente apresenta características específicas durante o processo de absorção, caracterizando diferentes velocidades de entrada na planta e também após a sua absorção, diferenciam na mobilidade (transporte dos nutrientes das folhas para outros órgãos pelo floema), que, varia de elemento para elemento, conforme discutido anteriormente (Tabela 14).

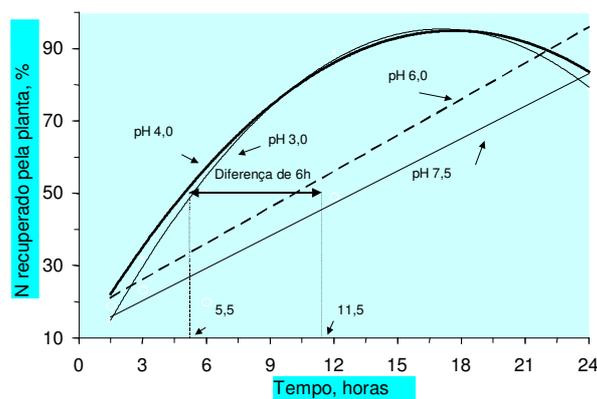
Quanto aos nutrientes ditos parcialmente móveis, estudos recentes com citrus, utilizando a técnica isotópica, indicam a baixa eficiência destes nutrientes na nutrição da planta. Neste sentido, Boaretto et al. (2003), a partir dos resultados obtidos, concluíram que a adubação foliar com micronutrientes tem sido um meio eficiente de fornecimento de Zn, Mn e B às folhas que recebem a pulverização, mas é insuficiente para alterar o teor destes micronutrientes nas folhas novas das laranjeiras que nascem após a pulverização foliar. Os resultados indicam que menos de 10% das quantidades Zn e Mn que são depositadas na superfície das folhas de laranjeira são absorvidas, mas são insuficientes para elevar os teores dos micronutrientes das folhas que recebem a adubação foliar. Menos de 1% das quantidades do Zn e do Mn depositadas nas folhas são transportadas as partes da laranjeira que crescem após a adubação foliar e são insuficientes para alterar

significativamente os teores foliares destes micronutrientes nestas partes. Salienta-se que a quantidade translocada é pequena (1%) e não chega a impressionar o filme radiográfico posto em contato com as partes novas das folhas (Figura 22).



**Figura 22.** Radioautografia. a - Folhas 1, 2 e 3 receberam  $^{54}\text{Mn}$ ; b - Folhas que receberam  $^{65}\text{Zn}$  e c - Ramo novo que desenvolveu depois que o  $^{65}\text{Zn}$  foi aplicado. O contorno das folhas foi desenhado para localizar o ramo no filme radiográfico (Boaretto et al., 2003).

**pH da solução:** a solução pode modificar o pH da superfície foliar, alterando a permeabilidade da cutícula, aumentando a velocidade de absorção logo no início do processo. Neste sentido, Rosolem et al. (1990), verificaram que o N das soluções de pH baixo (3,0 a 4,0), foi absorvido mais rapidamente que o de soluções com pH mais alto (6,0-7,0), atingindo 50% do N aplicado após 5,5 e 11,5 horas, respectivamente (Figura 23).



**Figura 23.** Taxa do N recuperado na planta de algodão, em função do pH da solução e do tempo de absorção (Adaptado, Rosolem et al., 1990).

Swanson & Whitney (1953) ao trabalharem com fontes de fosfato de pH variável, observaram maior absorção de fósforo por folhas de feijoeiro a partir de soluções que apresentaram menor valor de pH. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (1995), que observaram maior absorção de S pelo feijoeiro a partir de fontes com menor valor pH.

A **luz** é outro fator a ser considerado tendo em vista a sua participação no processo fotossintético e produção de energia indispensável para a fase ativa da absorção. Assim, no escuro, inexistente esta fonte de energia e ocorre menor velocidade de absorção.

## b) Fatores internos

Entre os fatores internos, ou seja, aqueles ligados à planta, são considerados a umidade da cutícula, a superfície da folha, a idade e o estado iônico interno.

A **umidade da cutícula** apresenta-se como fator importante para o caminhar do elemento químico na fase passiva da absorção. Considerando que o processo de difusão dos elementos faz parte dessa dinâmica, um nível mínimo de umidade é indispensável para a sua ocorrência. Assim, as cutículas desidratadas, em folhas murchas, são consideradas praticamente impermeáveis.

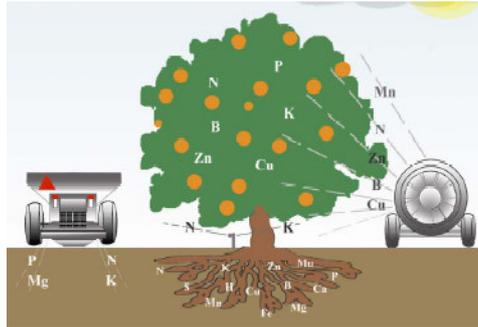
A **superfície da folha** é considerada um fator interno importante à medida que a página superior e inferior da folha apresentam-se com alguns aspectos anatômicos distintos.

Na literatura, tem sido indicado que a absorção foliar de nutrientes ocorre preferencialmente na face da folha, onde a cutícula é mais fina (a exemplo da face inferior ou folha sombreada) e também a região que predomina maior quantidade de estômatos. Nesta face com maior quantidade de estômatos, tem muitas células guardas, que por sua vez, tem alta quantidade de poros. E associado a isto, a composição da cera cuticular das células-guarda oferece menor resistência a passagem de solutos (Karabourniotis et al., 2001). Ao passo que a entrada de íons pela cavidade estomatal é pouco provável, pois a entrada de líquidos é insignificante devido a sua arquitetura (Ziegler, 1987) e a presença do revestimento da cutícula, embora de espessura fina, e de gases (pressão positiva) que também impedem a passagem da solução.

A **idade da folha** é considerada importante na medida em que, com o amadurecimento e envelhecimento da folha, há um maior desenvolvimento da cutícula o que aumenta a resistência da solução à penetração e, conseqüentemente, o processo de absorção ficaria mais difícil.

O **estado iônico interno (estado nutricional)**, tal como visto para a absorção radicular, dentro de limites, regula a quantidade de elementos a serem absorvidos. Nesse sentido, quanto maior a concentração de elementos químicos nas células da folha, maior será a dificuldade na absorção de novos elementos.

Por fim, salienta-se que a nutrição das plantas com a aplicação foliar de nutrientes deve ser utilizada sempre como um complemento da adubação via solo (Figura 24).



**Figura 24.** Aplicação de nutrientes via solo e folha.

#### Aspectos gerais da pulverização foliar

A aplicação foliar com formulações como N-P-K tem-se mostrado negativa, com exceção do N-Uréia, pelos seguintes motivos:

- \* grande quantidade de nutrientes exigidos pelas plantas no início de seu desenvolvimento;
- \* pouca área foliar, no início da cultura;
- \* problemas de queima de folhas;
- \* dentre as muitas formas de P e K estudadas, poucas se adaptam à aplicação foliar;
- \* custo da operação.

Além de problemas estritamente de compatibilidade, a presença de um nutriente na solução pode afetar negativamente a absorção de outro, principalmente nas soluções multinutrientes.

A adubação foliar, têm algumas vantagens, como:

- \* o alto índice de utilização, pelas plantas, dos nutrientes aplicados nas folhas;
- \* correção de algumas deficiências de micronutrientes em curto prazo de tempo;
- \* possibilidade da aplicação de micronutrientes juntamente com os defensivos agrícolas;

---

Cabe salientar que a aplicação foliar de nutrientes exige uma série de cuidados fundamentais para sua máxima eficiência, tais como:

\* A adubação foliar não pode ser utilizada como regra de substituição da adubação via solo e, sim, como complemento.

\* A adubação foliar para macronutrientes não introduz o incremento suficiente no tecido foliar e, conseqüentemente, não apresenta reflexos significativos na produção; portanto, para estes nutrientes, não é vantajoso o uso desta técnica.

\* A água utilizada deve ser limpa, pois a presença de impurezas como argila, pode causar reações com nutrientes, reduzindo sua ação.

\* O valor pH da solução deve ser controlado.

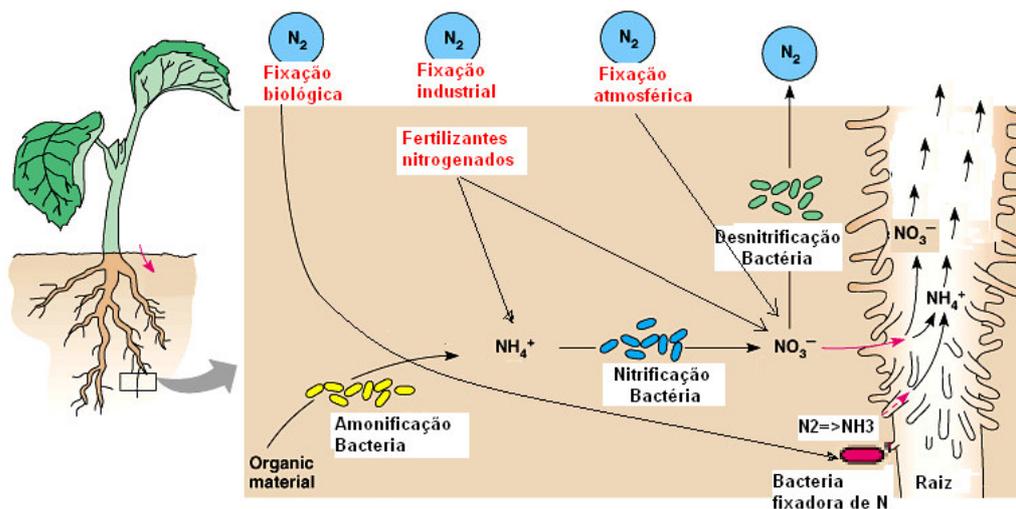
\* O uso de tecnologia de aplicação apropriado, como equipamentos bem regulados (bicos específicos, pressão, altura da barra) para que garanta maior homogeneidade e com reduzida deriva.

O uso de espalhante adesivo mostra-se importante para aumentar a superfície de contato da calda-folha e, conseqüentemente, o incremento da absorção.

## Capítulo 4 NITROGÊNIO

### 4.1. Introdução

Analisando a distribuição do nitrogênio na natureza, observa-se predominância na atmosfera (78,3%), sendo encontrado na biosfera (0,27%). Entretanto, na litosfera e hidrosfera inexistem o elemento. Assim, a atmosfera é o principal reservatório de N, atingindo 82 mil t no ar que circunda 1 ha. Este reservatório é praticamente inesgotável, uma vez que existem processos (desnitrificação) que reabastecem constantemente a atmosfera. Apesar desta abundância, a forma  $N_2$  presente no ar, não é diretamente aproveitável pelas plantas, uma vez que elas apenas reconhecem o nitrogênio nas formas assimiláveis amônio ( $NH_4^+$ ) ou nitrato ( $NO_3^-$ ). Assim, para a nutrição das plantas, torna-se necessária a transformação do  $N_2$  gasoso para as formas assimiláveis. Para isso, existem três processos que podem ser utilizados: fixação biológica, fixação industrial e fixação atmosférica (Figura 25).



**Figura 25.** Processos de fixação do nitrogênio atmosférico ( $N_2$ ).

Dentre os processos, o que apresenta maior potencial de adição de nitrogênio ao solo e também com maior taxa de benefício/custo, é o processo da fixação biológica. Os principais sistemas fixadores são: os livres e os simbióticos.

Os sistemas livres podem ocorrer em cultivo de arroz inundado, por meio de algas azuis verdes (*Azolla*), sendo capaz de fixar cerca de  $500 \text{ kg de N ha}^{-1}$  e, também, em gramíneas (arroz, pastagem, milho, sorgo e cana-de-açúcar) que, por meio de fixadores livres (*Azotobacter* e *Beijerinckia*), podem fixar cerca de  $30 \text{ kg de N ha}^{-1}$ .

O sistema simbiótico, de maior interesse agrícola, é constituído pela associação específica entre bactérias do gênero *Rhizobium* e leguminosas que desenvolvem nódulos característicos. Assim, a fixação biológica do  $N_2$  (FBN) é um processo significativo que, segundo estimativas, fornece entre 139 e 170 milhões de toneladas de N por ano para a biosfera, valores superiores aos 65 milhões aplicados com fertilizantes.

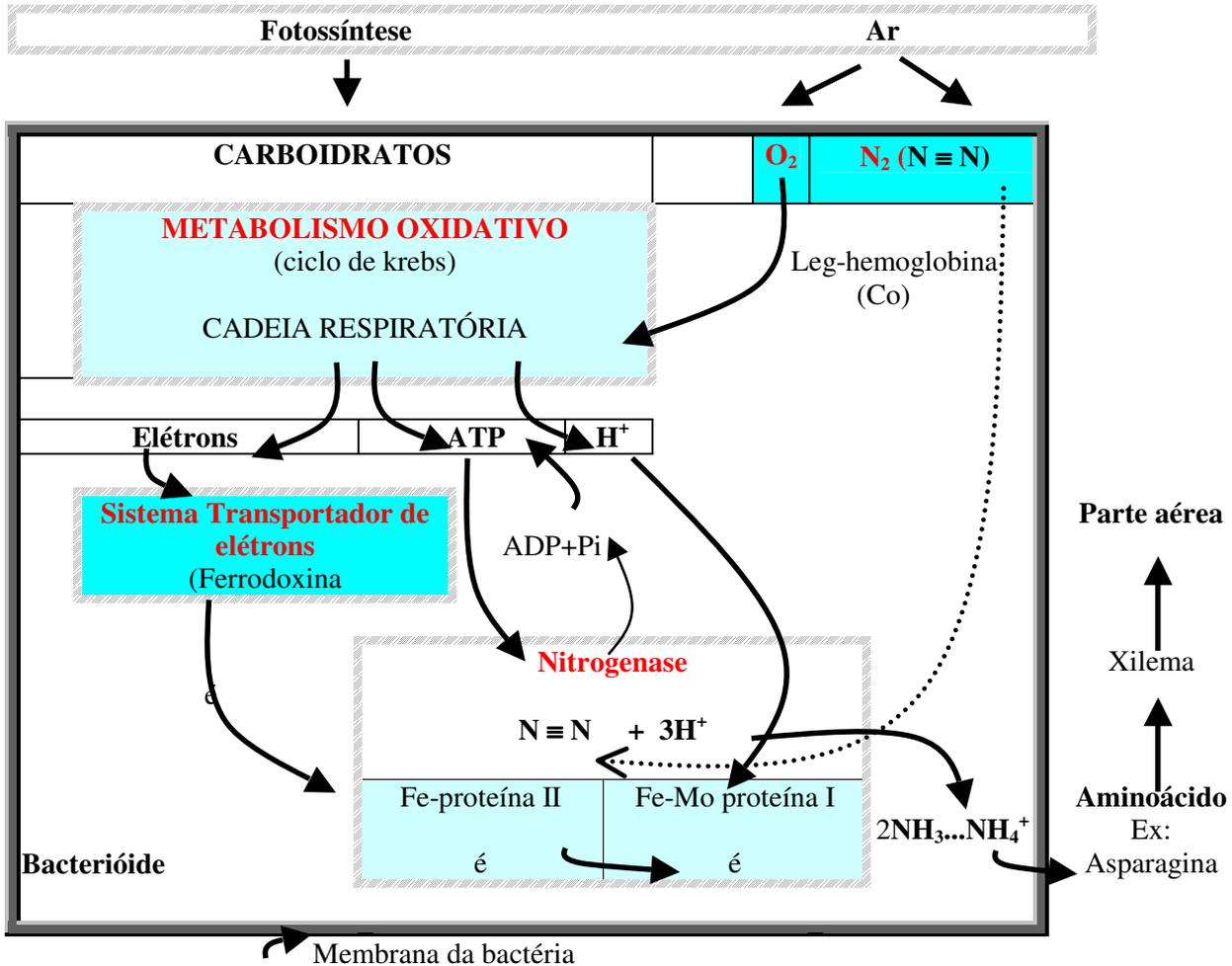
No Brasil, estudos com FBN tiveram início em 1963, com a Dra. Joana Döbereiner, época em que poucos cientistas acreditavam que estas pesquisas poderiam competir com fertilizantes minerais.

Desde então, a maioria das pesquisas nesta área, nas regiões tropicais, tem sido, de alguma maneira, influenciada pelas descobertas da Dra. Döbereiner da EMBRAPA. O programa brasileiro de melhoramento da soja, iniciado em 64, também foi influenciado, entre outros, pelos trabalhos da Dra. Döbereiner. Tornou-se o programa de melhoramento de soja de maior êxito, o totalmente baseado no processo de FBN. Sem o uso de adubos nitrogenados, o Brasil pôde competir, com sucesso no mercado internacional, tornando-se o segundo produtor mundial de soja. Esse fato tem representado para o Brasil uma economia anual de mais de um bilhão de dólares em fertilizantes nitrogenados.

Assim, em soja, este sistema simbiótico permite, em muitos casos, suspender a adubação nitrogenada, uma vez que o sistema pode fornecer cerca de 60% da exigência de N da planta. E em guandu, até 90% do N provém da FBN (Valarini & Gogoy, 1994). Ressalta-se que, a fixação biológica do N, a ligação tripla ( $N\equiv N$ ) é rompida, e 3 átomos de H são ligados a cada N, formando-se 2  $NH_3$  (amônia). Para isso, a planta hospedeira cede o carboidrato (vem da fotossíntese) ao microrganismo e este através de um sistema bioquímico realiza a “quebra” da ligação tripla do  $N_2$  fornecendo  $NH_3$  à planta. A energia (ATP, elétrons; H) utilizada pelo microrganismo provém da respiração por meio do metabolismo oxidativo. Assim, a fixação biológica do nitrogênio depende do metabolismo oxidativo que irá fornecer **ATP, elétrons** e **H**, também de um sistema transportador de elétrons e, por fim, da atuação do complexo da nitrogenase (Figura 26).

Ressalta-se que durante o metabolismo oxidativo é produzido o **H**, este é transferido direto ao complexo da nitrogenase, enquanto para os **elétrons**, é preciso um sistema transportador (a ferredoxina), aonde os mesmos chegam ao complexo da nitrogenase, ou seja, a Fe-proteína I (4 átomos de Fe e 4 átomos de S) transfere os elétrons para a Fe-Mo proteína II (até 40 átomos de Fe e 2 átomos de Mo), tendo seu co-

fator o Mo e o Fe, onde  $N_2$  se liga, na presença dos elétrons que serão utilizados para quebrar a ligação  $N\equiv N$ . Para isso é também preciso energia (ATP), que tem origem no metabolismo oxidativo “alimentado” pelo  $O_2$ , transportado pela leg-hemoglobina. A presença dessa proteína no nódulo resulta em uma cor vermelha no seu interior, característica de nódulos ativos. Salienta-se que o Co faz parte da vitamina B12, onde este último é necessário para síntese da leg-hemoglobina.

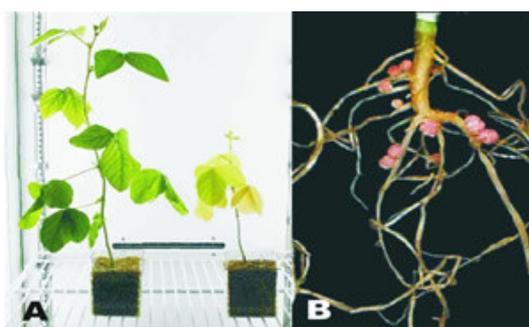


**Figura 26.** Reações metabólicas de fixação biológica do nitrogênio nos bacterióides.

No final, a amônia ( $NH_3$ ) produzida no processo é transferida para fora do bacterióide e, no hospedeiro, é incorporada à alfa-ceto-ácidos, formando compostos como a glutamina, uréides e asparagina que serão transportados via xilema para a parte aérea da planta, onde entrarão no metabolismo normal do N.

É pertinente destacar que o sistema simbiótico é um processo mediado por um complexo enzimático denominado **nitrogenase** com a participação direta de alguns nutrientes como o Ca, Fe, Mo, Mg, Co e P (ATP). Assim, a deficiência destes nutrientes pode induzir a baixa fixação biológica de N, podendo causar sintomas de deficiência do elemento na leguminosa (Figura 27).

Sendo assim, pesquisas têm indicado que a atividade do complexo da nitrogenase pode responder positivamente à aplicação de certos nutrientes, como Ca, P e Mo (Figura 28). Além desses, o próprio N em doses elevadas reduz drasticamente a FBN. Neste sentido, Waterer & Vessey (1993) demonstraram que embora o nitrogênio seja particularmente inibitório ao crescimento do nódulo e à atividade da nitrogenase, é menos prejudicial ao processo de infecção. Entretanto, em pequenas quantidades de N no solo (vindo da mineralização da MO) pode favorecer a simbiose (Marschener, 1995), possivelmente pelo aumento na fotossíntese proporcionando maior energia para sistema simbiótico.



**Figura 27.** Plantas de soja infectada com *B. japonicum*, bem desenvolvida, e um controle (a) e o sistema radicular com presença dos nódulos (b).

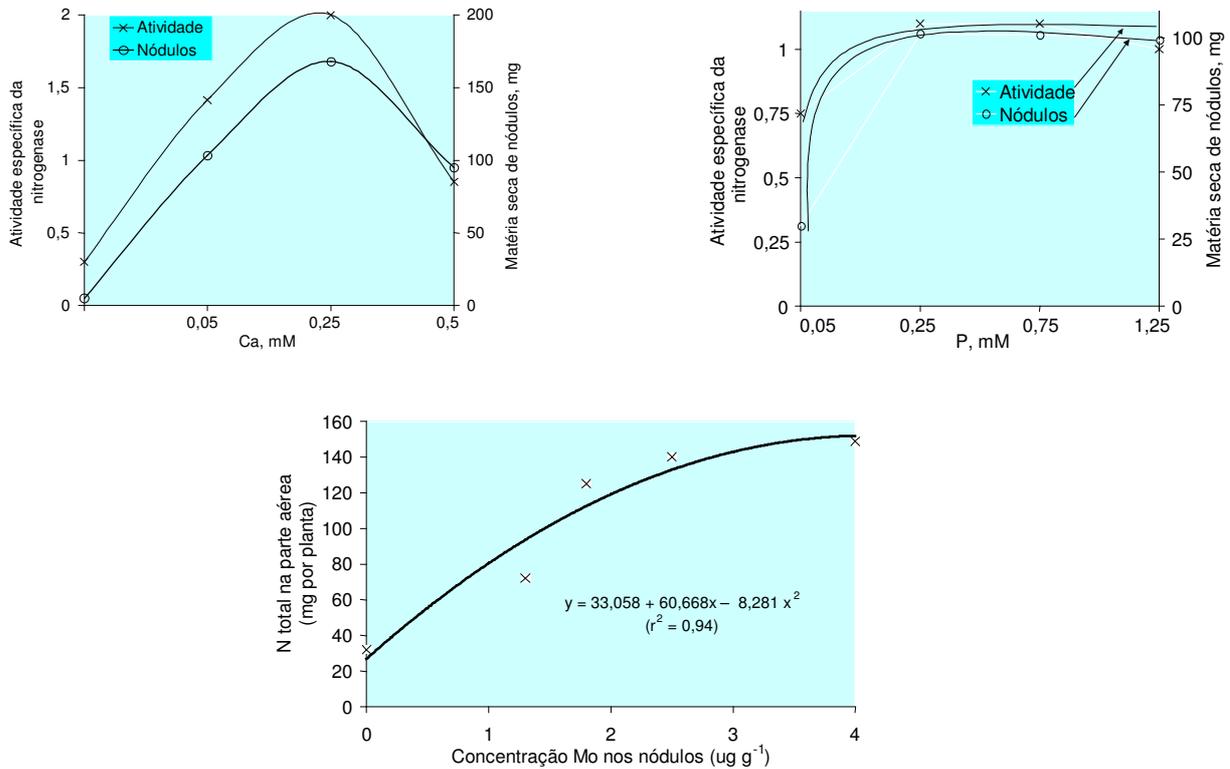
A fixação industrial refere-se a produção de fertilizantes nitrogenados por processo industrial, que exige alta quantidade de energia (1035 kJ/mol) para “quebrar” a forte ligação tripla da molécula  $N\equiv N$  presente no ar, a partir do ferro metálico como catalisador e depende de altas temperaturas ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e pressões (200-600 atm) para combinar  $N_2$  e  $H_2$  produzindo amônia ( $NH_3$ ), origem de vários fertilizantes nitrogenados.

A fixação atmosférica refere-se às descargas elétricas, comuns na época chuvosa, que unem N e  $O_2$ , formando óxidos que se podem decompor ou unir à água, atingindo o solo pela ação da chuva. Esta adição de nitrogênio pode fornecer de 2 até 70 kg de  $N\text{ ha}^{-1}$ , dependendo da precipitação, da frequência das descargas elétricas, da proximidade de indústrias que liberam gases nitrogenados para a atmosfera, etc.

Assim, com a fixação do  $N_2$  da atmosfera, por via industrial, biológica ou atmosférica, tem-se um aumento da concentração do nitrogênio na solução do solo e, o aproveitamento pela planta.

No solo, o nitrogênio encontra-se na maior parte na forma orgânica (95%) não-assimilável pela planta e o restante, na forma mineral assimilável, especialmente na forma de nitrato ( $NO_3^-$ ) ou amônio ( $NH_4^+$ ).

Um aspecto que beneficia a predominância do N na forma orgânica é que a adição de N na forma mineral tende a passar para a forma orgânica, devido à alta atividade microbiótica presente no solo, onde grande parte do N aplicado no solo é imediatamente absorvida pelos microrganismos (incorporados aos seus corpos) e apenas após sua morte passará para a forma mineral assimilável pelas plantas.



**Figura 28.** Efeito do Ca, P na atividade da nitrogenase e do Mo no teor de N na parte aérea do feijoeiro.

A passagem do N da forma orgânica para a mineral como amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é denominada mineralização que compreende vários processos, ou seja:

**N-orgânico** (proteína: C-C-N-C-...)  $\Rightarrow$  **N-amídico** ( $\text{R-NH}_2$ )  $\Rightarrow$  **N-amoniaco** ( $\text{NH}_4^+$ )  $\Rightarrow$  **N-nitrato** ( $\text{NO}_3^-$ )  
 (aminização) (amonificação) (nitrificação)

Salienta-se, que o primeiro passo na mineralização do N-protéico no solo envolve sua hidrólise, catalisada por enzimas denominadas proteases. A ação dessas enzimas dá origem a uma mistura de aminoácidos (Burns, 1982) e em seguida sofre uma série de reações, até a produção do primeiro composto nitrogenado, na forma mineral ( $\text{NH}_4^+$ ). O amônio pode estar sujeito a volatilização ( $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3\text{aq} + \text{H}^+$ ) com aumento da sua concentração em solução deslocando o equilíbrio da reação para a direita ( $>\text{NH}_3$ ) e/ou pela diminuição da concentração de  $\text{H}^+$  ( $\text{pH} > 7$ ), visto que o  $\text{pK}_a$  da reação é 9,5 ou seja é o pH da solução em

que a concentração de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NH}_3$  é de 50% e portanto, valor de pH menor 7 ou 9 terá, respectivamente 0,4% e 36% do N total na forma de  $\text{NH}_3$ . É pertinente, salientar que a atividade de proteases do solo tem correlação com o N-foliar (Silva & Melo, 2004).

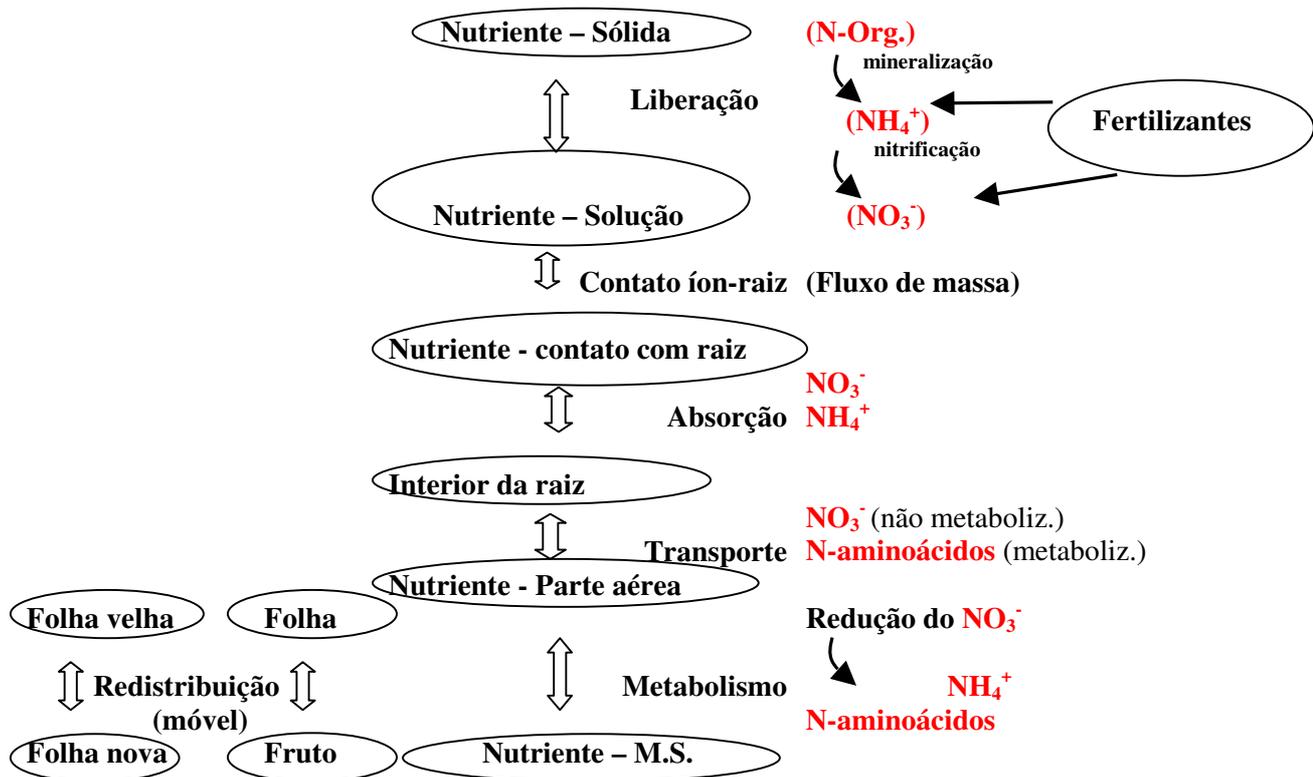
Assim, conhecer os fatores que favorecem a mineralização (temperatura=30°C; umidade=50-60% da capacidade de campo; solo arejado; pH > 6,0; C/N de resíduo vegetal <20/1) é importante para manter maior concentração de N na forma mineral na solução do solo, favorecendo maior absorção pela planta.

Desse modo, em solos com alto aporte de material vegetal, especialmente de gramíneas que apresentam alta relação C/N (40-80), o fenômeno da mineralização somente será efetivo, ou seja, predomínio do N na forma mineral, após 15-30 dias da aplicação do fertilizante. Logo, no manejo da cultura é importante considerar isso, para evitar que a planta tenha certa deficiência de N, mesmo após a aplicação do fertilizante.

No estudo do nitrogênio e dos demais nutrientes no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre, desde a solução do solo; raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até na sua incorporação em um composto orgânico ou como um ativador enzimático, que desempenhará funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 29).

Para isso, existem vários processos (liberação da fase sólida para a líquida; contato íon-raiz; absorção; transporte; redistribuição) que governam a passagem do nutriente nos diferentes compartimentos para ser devidamente metabolizado desempenhando as suas funções específicas na vida do vegetal para propiciar o acúmulo de matéria seca na planta. Por isso, para maximizar a conversão do nutriente aplicado em produção agrícola, é preciso satisfazer à exigência nutricional da planta, ou seja, atender, em termos quantitativos os nutrientes (macros e micros) em todos os estádios de crescimento/desenvolvimento para atingir a produção agrícola esperada (máxima econômica).

Ressalta-se que cada cultura apresenta uma exigência nutricional específica que garantirá maior conversão em produto agrícola, desde que não ocorra qualquer desordem nutricional, seja por deficiência, seja por excesso.



**Figura 29.** Dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

#### 4.2 Absorção, transporte e redistribuição do nitrogênio

##### a) Absorção do nitrogênio

Antes que ocorra a absorção propriamente dita do nitrogênio pela planta, é preciso ocorrer o contato deste nutriente com a raiz. Especificamente, para o N (conforme dito anteriormente – capítulo Absorção iônica radicular), este movimento do nutriente no solo é governado pelo fenômeno de fluxo de massa (movimento de íons “junto com” água), responsável por mais de 99% do contato N-raiz (Tabela 10). Isto depende, além da concentração do elemento na solução do solo, do fluxo da água (solo-planta) que aumenta com o volume de água absorvido pela planta (taxa de transpiração). Assim, para garantir o maior contato N-raiz e, conseqüentemente, maior absorção, é preciso manter a umidade do solo adequada.

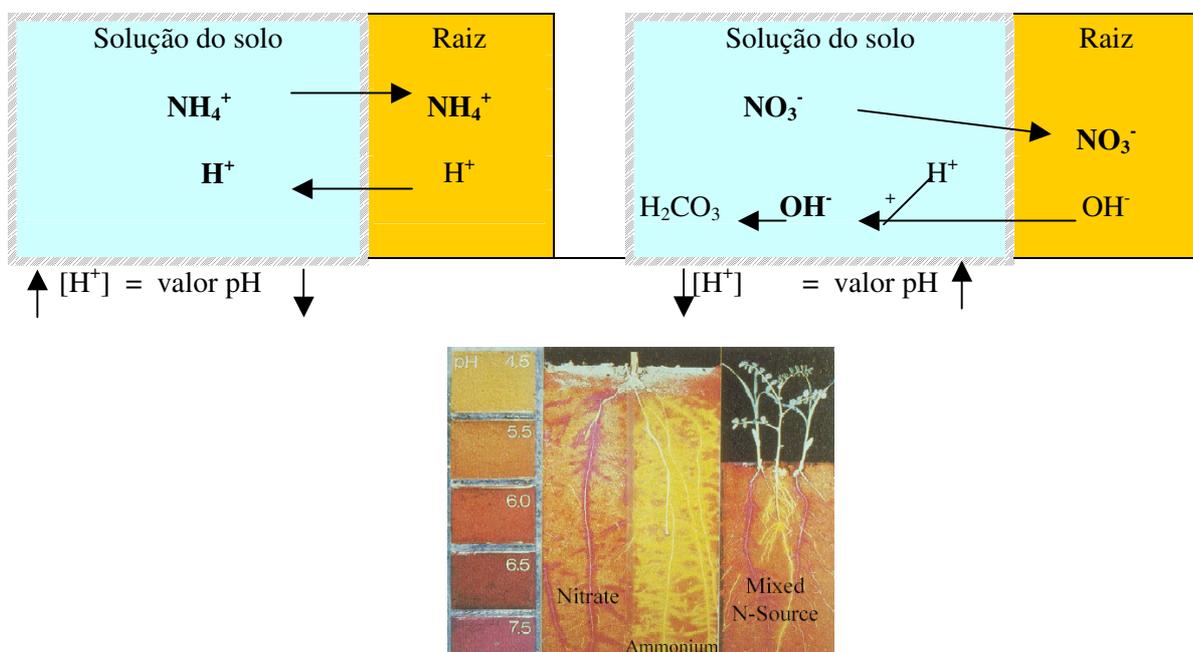
Logo após o contato N-raiz tem-se o processo de absorção. As formas de absorção do nitrogênio pelas plantas são:

$N_2$  (fixação biológica); Aminoácidos; Uréia;

$NH_4^+$  e,  $NO_3^-$  (predomina)

Dentre as diferentes formas do nitrogênio absorvidas pelas plantas, as mais importantes são nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ) e amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ). Entretanto, a forma de nitrato é a que predomina durante o processo de absorção, por ser a mais abundante na solução do solo, devido à alta atividade da microbiota do solo, em desenvolver o processo de nitrificação ( $\text{NH}_4^+ \Rightarrow \text{NO}_3^-$ ). Assim, a concentração de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NH}_4^+$  na solução do solo é de 100-50.000 e 100-2.000  $\mu\text{mol L}^{-1}$ , respectivamente (Barber, 1995). Cabe salientar, que o nitrogênio absorvido na forma de nitrato pode ser armazenado no vacúolo das células ou metabolizado, ao passo, que o amônio absorvido deve ser todo metabolizado, pois não se acumula na planta por ser tóxico.

A absorção de  $\text{NH}_4^+$  resulta na liberação de prótons ( $\text{H}^+$ ) para o meio, acidificando-o, entretanto, o contrário é verificado quando a planta absorve  $\text{NO}_3^-$ , pelo processo de co-transporte de prótons, retirando  $\text{H}^+$  da solução ou liberação de  $\text{OH}^-$  (Figura 30).



**Figura 30.** Esquema ilustrativo de variação média no valor pH da solução do solo em função da fonte de nitrogênio ser amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) ou a mistura de ambas, fornecida à uma planta qualquer.

Estes fenômenos ocorrem pelo fato de a planta “procura” uma manutenção da neutralidade elétrica interna no citoplasma.

Assim, o uso da fonte de N na forma amoniacal promove acidificação do solo, seja por extrusão de um próton ( $\text{H}^+$ ), e associado com a inibição processo da nitrificação promove reação ácida no solo rizosférico. É pertinente salientar que a medida que tem diminuição do pH da rizosfera, poderá afetar a

aquisição de micronutrientes (Mn e Zn) e Si, com reflexos na diminuição da incidência de doenças (Hömheld, 2005).

Observa-se, ainda, que existem fatores que podem afetar o processo de absorção do nitrogênio, a exemplo dos fatores externos e internos discutidos anteriormente (*capítulo absorção iônica radicular*). Entretanto, têm-se alguns fatores específicos para o N, como:

### **pH “efeito direto”**

Em pH ácido, ou seja, alta concentração de  $H^+$ , tem-se uma competição com  $NH_4^+$  inibindo a sua absorção pela planta, enquanto em pH próximo do alcalino, tem-se alta concentração de  $OH^-$  e, assim, existe inibição de fontes à base de  $NO_3^-$ . É importante, pois, um equilíbrio das formas de nitrogênio ( $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ) para manter um valor pH satisfatório, que não prejudique a taxa de absorção de N pela planta. E além disso, o uso de uma proporção de N na forma de amônio, promoveria uma economia de energia para planta, pois este não precisa ser reduzido e já entraria direto nos esqueletos de carbono. Ao passo, que o fornecimento para a planta de apenas amônio deverá ter redução na produção de matéria seca pois a planta não teria a capacidade de incorporar todo o N amoniacal nos esqueletos de carbono (por falta dos esqueletos) em tempo hábil e com pH celular alcalino teria a conversão em  $NH_3$ , o que provocaria toxidez.

Neste sentido, dados de pesquisa em meio hidropônico, indicam o efeito positivo do equilíbrio das fontes de nitrogênio. Sendo que a maior proporção do nitrogênio na forma de nitrato é mais vantajoso no crescimento das plantas, do que a maior proporção do N na forma de amônio. Em forrageiras o maior desenvolvimento ocorreu quando cultivada na solução de nitrato/amônio de 100/0 à 55/45, ao passo que houve prejuízo no atributo produtivo quando a proporção de nitrato/amônio foi de 25/75 (Santos, 2003) e em mudas de grábia, a quantidade de amônio deve ser moderada, não ultrapassando a relação 75/25 ou 4:1 (Nicoloso et al., 2005). Enquanto que na cultura do milho a relação  $NO_3^-/NH_4^+$  50/50 foi superior a relação 100/0 (Below, 2002) (Tabela 17). Salienta-se que o muito nível alto de amônio na planta pode ocorrer pela absorção excessiva do mesmo e/ou pela falta de esqueletos de carbono para sua incorporação, podendo levar a atingir níveis tóxico nas plantas.

Por fim, a relação ideal de nitrato e amônio para as plantas, depende da espécie, da idade da planta e do pH do médio de crescimento da cultura (Haynes e Goh, 1978).

A forma de N utilizada nas culturas também pode afetar a absorção de cátions e ânions do solo. Neste sentido, Noller Rhykerd (1974) trabalhando com forrageira verificaram que ao utilizarem o nitrogênio na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) observaram aumento no teor de cátions Ca, Mg e K e menores de ânions P e S. Ao passo que a utilização de N na forma de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), encontraram teor maior de P e S na massa seca das plantas. O comportamento diferenciado para cada forma empregada é devido ao balanço entre cátion e ânion.

**Tabela 17.** Efeito da forma de N na produção e nos parâmetros fisiológicos de milho em cultivo sob meio hidropônico (Below, 2002).

Variáveis	$\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$	
	100/0	50/50
Produção ( $\text{t ha}^{-1}$ )	12,3	13,8
Número de grãos (número por planta)	652	737
Absorção de N pela planta ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	279	343

### Idade da raiz

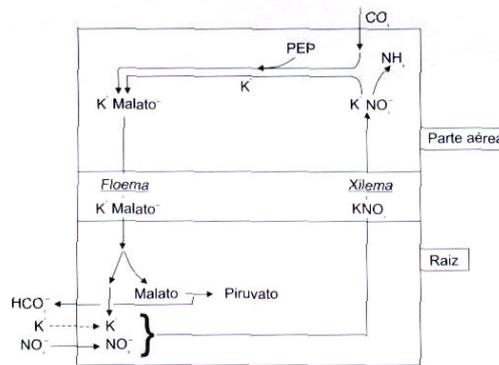
As raízes novas apresentam alta capacidade de absorção do nitrogênio, enquanto as raízes mais velhas apresentam baixa capacidade (Tabela 18).

**Tabela 18.** Taxas de absorção de nutriente pelo milho, em função da idade da planta (dias)

Idade da planta (dias)	N ( $\mu\text{mol/m raiz/dia}$ )
20	227
30	32
40	19
50	11
60	6
70	1
80	0,5

### Presença de outros nutrientes

Em culturas anuais, a presença do K pode aumentar a absorção de N, e também serve como contra-íon, favorecendo o transporte do nitrato para a parte aérea. E a presença do K na parte aérea “transportará” o malato para a raiz que, por meio do seu “metabolismo oxidativo” sofrerá descarboxilação, liberando o  $\text{HCO}_3^-$  para meio e em troca tem-se absorção do nitrato (Figura 31).



**Figura 31.** Modelo para circulação de K entre a raiz e a parte aérea no transporte de nitrato e malato (Marschner, 1995)

Além disso, a presença do P também aumenta a absorção do N especialmente do nitrato. Neste sentido, Magalhães (1996) verificou em solução nutritiva que a omissão de P, por dois dias, reduziu a absorção do nitrato (63%) em plantas de milho. Portanto, em solos com baixo teor de água a difusão do P é prejudicada e, conseqüentemente, a sua absorção e com reflexos na absorção do N.

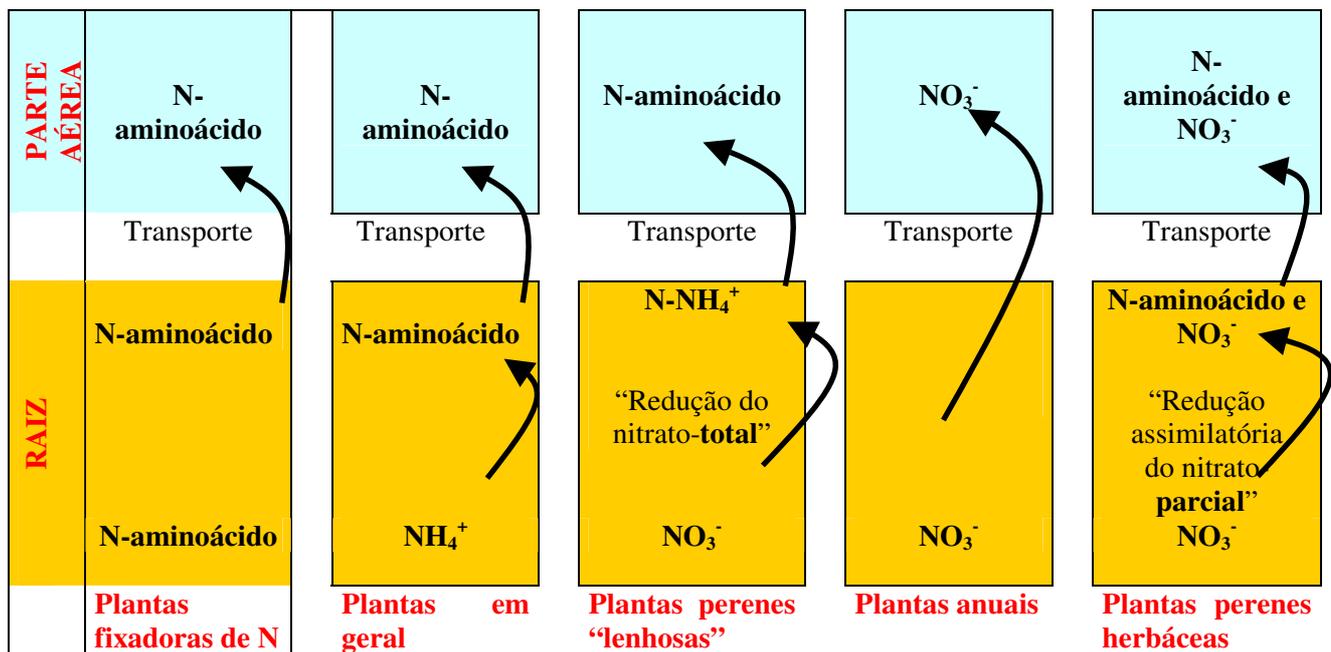
Salienta-se, ainda, que existe um efeito negativo do  $\text{NH}_4^+$  na absorção de outros cátions ( $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{+2}$ ), devido mais ao seu efeito acidificante no citosol, do que a competição pelos sítios de absorção.

### b) Transporte do nitrogênio

A forma como o nitrogênio é transportado depende da forma absorvida amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ) e do metabolismo das raízes. A maior parte do  $\text{NH}_4^+$  absorvido é, geralmente, assimilada nas raízes, enquanto o  $\text{NO}_3^-$  é metabolizado pelas raízes ou transportado para a parte aérea como tal (Mengel & Kirkby, 1987) ou ainda, estocado no vacúolo das células das raízes. Portanto, o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) absorvido, em plantas lenhosas como a seringueira, pode aí ser metabolizado através da “redução do nitrato”, uma vez que a enzima “redutase” concentra-se nas raízes e, assim, tem-se acúmulo de  $\text{NH}_4^+$ , de forma que este é transportado para a parte aérea para, em seguida, sofrer a incorporação nos esqueletos de C, transformando-se em N-aminoácidos, visto que nas folhas, concentram-se as enzimas GS e GOGAT (Delu Filho et al., 1994). Isto ocorre especialmente em plantas perenes lenhosas, e em plantas anuais, esta redução assimilatória não ocorre e, dessa forma, o nitrato é transportado para a parte aérea. Nas plantas perenes herbáceas, uma parte do nitrato absorvido é metabolizada nas raízes e a outra parte não sofre tal redução. Assim, têm-se as duas formas presentes (“N-aminoácido” e  $\text{N-NO}_3^-$ ) no processo de transporte deste grupo de plantas. Em

cana-de-açúcar, a atividade da redutase nas folhas é muitas vezes maior que nas raízes (Silveira & Crocomo, 1981). Enquanto em plantas fixadoras de N<sub>2</sub>, a maior parte do N provém da FBN, nas raízes, predomina o N-aminoácidos (asparagina), que são transportados à parte aérea (Figura 32).

Em leguminosas tropicais como caupi, soja e feijão predomina transporte de N na forma de ureídeos (ex. alantoína) ou amidas em amendoim, alfafa, tremoço, trevo, ervilha e lentilha (ex. asparagina; glutamina) (Marenco & Lopes, 2005).



**Figura 32.** Formas de transporte do nitrogênio em função da forma absorvida e o respectivo metabolismo “redução assimilatória do nitrato” de grupos de plantas.

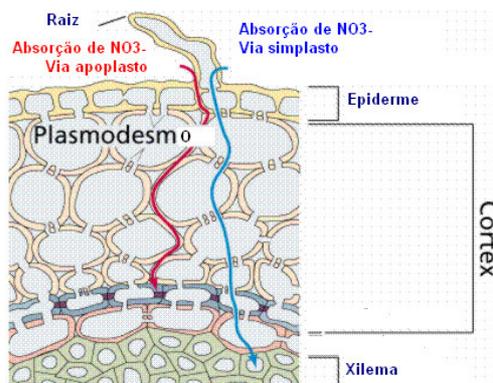
Soma-se a isto, que na literatura existe uma indicação geral que em grande parte das espécies adaptadas a regiões de clima temperado e em condições de baixa concentração de nitrato no solo, a redução do nitrato absorvido se dá nas raízes, portanto, o N é transportado na forma de amônio, ao passo, que em espécies de clima tropical, a redução do nitrato tende a ocorrer na parte aérea da planta, sem depender da concentração externa deste íon, e assim o transporte ocorre na mesma forma que o nutriente foi absorvida (Nambiar et al., 1988). Portanto, nota-se que no transporte a longa distância, os nutrientes não são necessariamente transportados na forma iônica absorvida, podendo ser levados na forma orgânica em

compostos de baixo peso molecular (N-aminoácidos). Além dos aminoácidos, existem vários compostos orgânicos de baixo peso molecular (aminas, ureídeos, etc.) que também servem para transportar o N-orgânico a longa distância.

O aspecto do metabolismo do N, pela “redução assimilatória do nitrato”, será abordado no próximo item. É importante ressaltar que neste processo de transporte do nitrogênio e dos demais nutrientes, é necessário percorrer o seguinte caminho:

Epiderme => parênquima cortical => endoderme => cilindro central (xilema e floema).

Da epiderme até a camada única de células da endoderme, o nutriente deve “vencer” a parede celular e espaços intercelulares (apoplasto); pode, também, passar de uma célula para outra, caminhando pelo citoplasma e seus prolongamentos entre duas células (plasmodesmos), o que é o simplasto. A passagem do nutriente pela via apoplasto, através da endoderme, é impedida pela presença das estrias de Cáspari (suberina cimentada). Assim, tem que recorrer à via simplástica (processo ativo) e, em seguida, os nutrientes atingem os vasos do xilema. Desse modo, tem-se o transporte a longa distância até a parte aérea, por meio de um processo inteiramente passivo (Figura 33).



**Figura 33.** Corte transversal da ponta da raiz, indicando o transporte do nutriente, via caminhamento pelo apoplasto e/ou simplasto das células da epiderme, parênquima, endoderme e cilindro central.

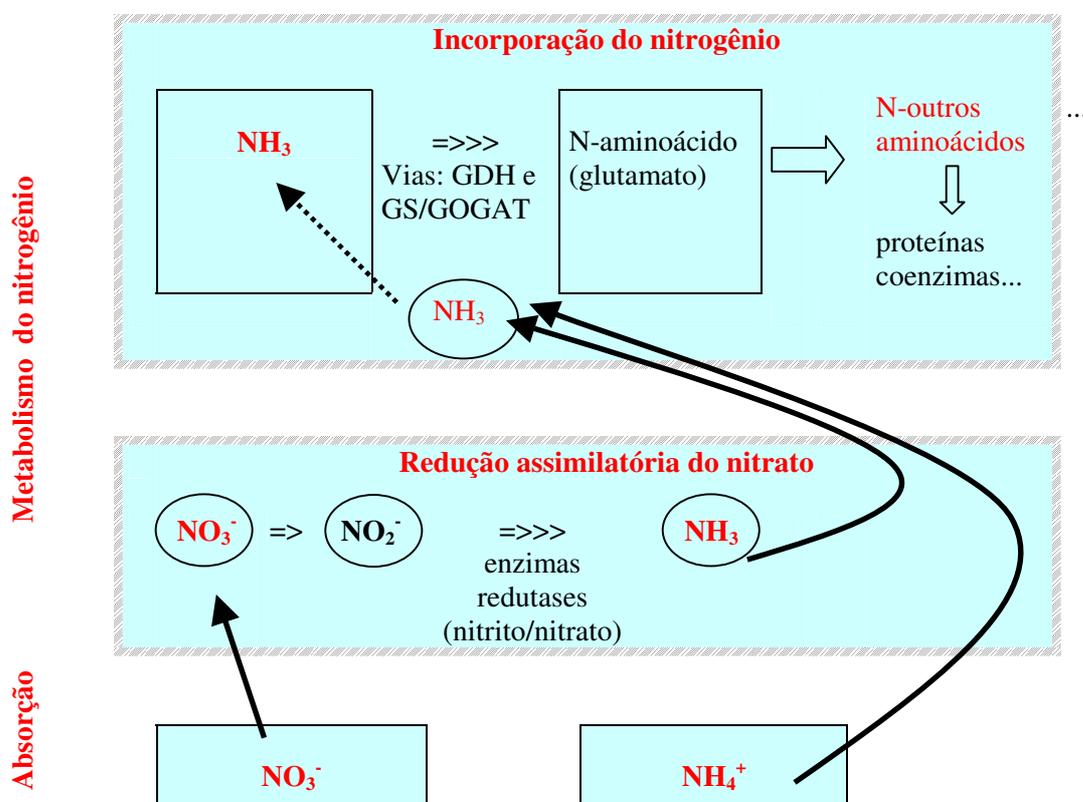
### c) Redistribuição do nitrogênio

O processo de redistribuição do nitrogênio ocorre exclusivamente na forma de N-aminoácidos, uma vez que nesta fase todo o  $\text{N-NO}_3^-$  já foi metabolizado. Este processo de redistribuição ocorre no floema, e o N-aminoácido apresenta alta mobilidade, ou seja, significa que se por qualquer razão for interrompido o processo de absorção e/ou transporte do N, a planta tem a capacidade de mobilizar o N presente na folha

velha, para uma folha nova ou outro órgão em crescimento que apresente alta demanda deste nutriente. Em consequência, a planta que teve um suprimento de N insuficiente (planta deficiente em N) deve demonstrar primeiramente os sintomas de deficiência na folha velha. Portanto, conhecer os aspectos da redistribuição dos nutrientes nas plantas, tem uma importância prática significativa, visto que é possível identificar, no campo a sintomatologia, característica do nutriente em plantas com deficiência nutricional. Ressaltamos que os detalhes da sintomatologia de deficiência nutricional do N serão abordados em item específico no final (*Sintomatologia de deficiências*).

### 4.3 Participação no metabolismo vegetal

O nitrogênio, antes de desempenhar suas funções nas plantas, sofre um processo de metabolização passando pela “**redução assimilatória do nitrato**” a partir da ação de enzimas redutases ( $\text{NO}_3^- \Rightarrow \text{NH}_3$ ), uma vez que apenas na forma  $\text{NH}_3$  é possível participar da via metabólica (GDH e GS/GOGAT) para a “**incorporação do nitrogênio**” em esqueletos de carbono (provindos da fotossíntese), gerando os aminoácidos (...-C-C-CN-C-C-...), e depois “**deriva-se**” em proteínas, coenzimas, vitaminas, pigmentos e bases nitrogenadas, que apresentam funções específicas no ciclo de vida dos vegetais (Figura 34).



**Figura 34.** Esquema simplificado do metabolismo do nitrogênio nas plantas (redução assimilatória do nitrato e incorporação do nitrogênio).

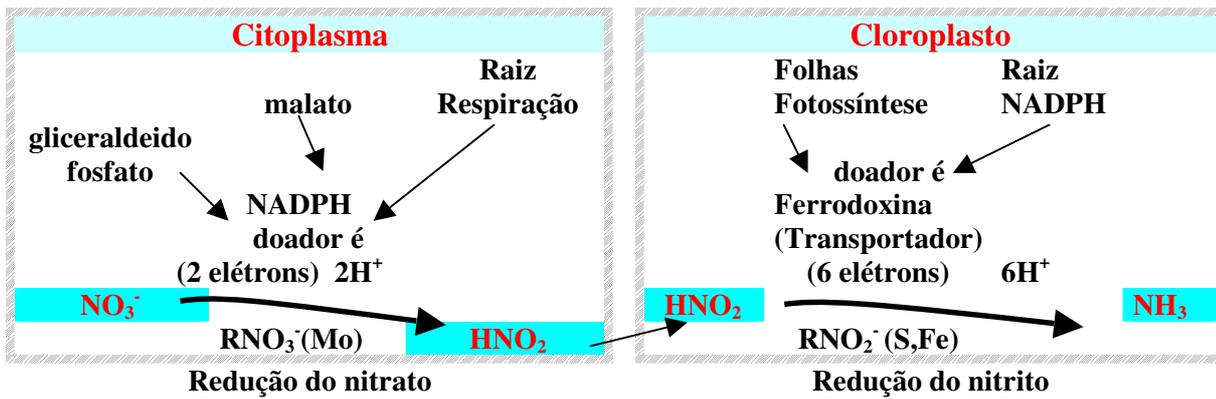
### a) Redução assimilatória do nitrato

Em função da predominância na absorção de nitrato, cujo número de oxidação do Nitrogênio é +5, há a necessidade de redução de seu número de oxidação, uma vez que a forma assimilável pela planta, forma amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) ou  $\text{NH}_3$ , apresentam número de oxidação igual a -3. Essa redução exige a doação de 8 elétrons que é feita pela ação das enzimas redutase do nitrito e redutase do nitrato. E essa reação exige alto consumo de energia respiratória. Essa transformação é denominada **redução assimilatória do nitrato** e é indispensável para que ocorra a incorporação do nitrogênio à um composto orgânico na planta e passe a exercer suas diversas funções. Essas etapas da incorporação do nitrogênio, e as suas funções nas plantas serão detalhados nos próximos itens.

A redução assimilatória do nitrato ocorre em duas fases:

- a) redução do nitrato a nitrito (transferência de 2 elétrons);
- b) redução de nitrito a amônia (transferência de 6 elétrons).

Para ocorrer a primeira fase, a redução do nitrato, há necessidade da atuação da enzima redutase do nitrato ( $\text{RNO}_3^-$ ), que é uma flavoproteína, composto de Fe e o Mo, sendo este último centro ativo deste complexo. A atividade desta enzima é facilmente determinado em tecido *in vivo* (Cazetta e Villela, 2004). Esta enzima localiza-se no citoplasma (células meristemáticas) e tem a capacidade de obter elétrons do NAD(P)H que transfere estes elétrons (dois) para o Mo que repassa-o, para a redução do nitrato em nitrito. O NAD(P)H é obtido de células fotossintetizadoras, por meio do gliceraldeído fosfato (plantas C3) ou do malato (plantas C4) ou mesmo da própria respiração, caso esta redução esteja ocorrendo na raiz. A passagem dos elétrons ocorre pela própria enzima  $\text{RNO}_3^-$ , pelo Mo, presente na sua composição, até o  $\text{NO}_3^-$  (Figura 35). Assim, experimentos indicam que aumento do NADH incrementa a produção de nitrito, ou seja, a redução do nitrato (Viégas & Silveira, 2002). Além disso, presença de elementos como Fe e especialmente de Mo também são importantes para redução do nitrato. As pesquisas têm mostrado que a baixa atividade da enzima redutase do nitrato é observada sob condições de baixa concentração do nitrato e de molibdênio. E esta enzima pode ser inibida pela presença de alta concentração de amônio ou certos aminoácidos/amidas. Assim, a atividade da enzima redutase de nitrato pode ser usada para avaliação do estado nutricional para o nitrogênio. Plantas com alta atividade desta enzima são indicadores de nível adequado de nitrogênio.



**Figura 35.** Esquema da redução do nitrato e do nitrito utilizado pelas plantas.

No segundo estágio, tem-se a redução do nitrito a amônia, catalisada pela redutase do nitrito ( $RNO_2^-$ ), que apresenta na sua constituição S (sulfeto) e Fe. Admite-se que essa reação ocorra nos cloroplastos, na superfície externa da membrana dos tilacóides e que exige a participação de um agente poderoso, a ferredoxina que, nas folhas, recebe elétrons diretamente da cadeia de transporte eletrônico da fotossíntese (fotossistema I) durante o dia e, no escuro, vem da respiração; nas raízes, o doador de elétrons é o NADPH. Entretanto, o carregador na raiz é desconhecido, visto que inexistente a ferredoxina na raiz (Figura 35). Salienta-se, ainda, que a redução do nitrito é muito dependente da luz, pois a ferredoxina tem a capacidade de agente doador apenas na presença da luz. No escuro, a redução do nitrito ocorre em taxas muito baixas.

É oportuno salientar que na falta de Mo, pode haver acúmulo de  $NO_3^-$  em plantas alimentícias o que é prejudicial aos animais, como por exemplo, nas forragens, se houver acúmulo de  $NO_3^-$ , este pode ser reduzido a  $NO_2^-$  no trato digestivo que, por sua vez, combina com a hemoglobina do sangue, produzindo um composto que não pode funcionar como transportador de  $O_2$ , levando o animal a sofrer de deficiência de oxigênio.

#### b) Incorporação do nitrogênio

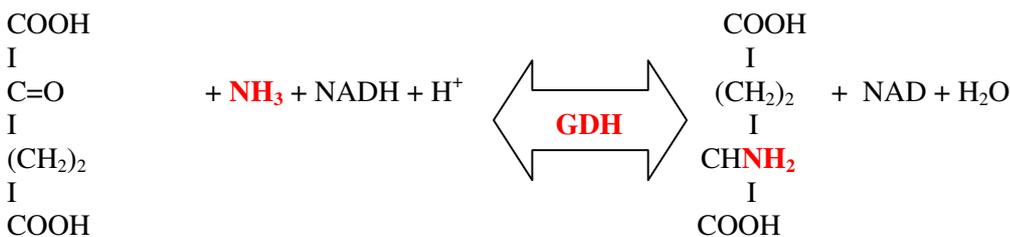
Uma vez reduzido o nitrogênio para a forma  $NH_3/NH_4^+$ , ele precisa ser prontamente incorporado pelas plantas que apresentam baixa tolerância a essa forma de nitrogênio, uma vez que pode ser tóxico, causando inibição de respiração, desacoplamento da fotofosforilação nos cloroplastos e até repressão na atividade da nitrogenase em plantas fixadoras de N. Salienta-se que o N-  $NH_4^+$  a ser metalizado, vem da

absorção radicular e também da degradação de compostos orgânicos (catabolismo), provindo da senescência das folhas ou até das reservas das sementes.

Com relação ao metabolismo, o nitrogênio é incorporado ao primeiro composto orgânico na planta (ácido alfa-ceto glutárico), converte-se em **ácido glutâmico** (N combinado com C-H-O), sendo que estas formas reduzidas de N vão gerar principalmente aminoácidos, fazendo parte de proteínas, enzimas, ácidos nucleicos e outros compostos nitrogenados, entre eles, a clorofila, pigmento que confere cor verde às folhas e tem o nitrogênio na sua composição.

A incorporação do nitrogênio, na forma de amônio, a compostos orgânicos foi descrita segundo Hewitt & Cutting (1979), principalmente por duas vias, que ocorrem simultaneamente.

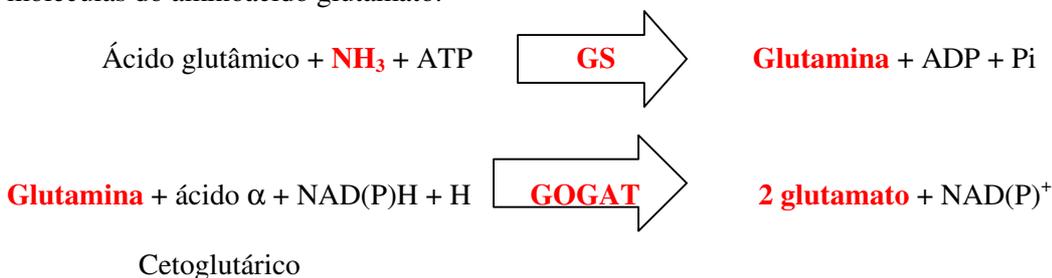
- 1- **Via desidrogenase glutâmica (GDH)**, que ocorre nas mitocôndrias das folhas e raízes, a partir da reação de aminação do ácido  $\alpha$  cetoglutárico, da seguinte forma:



**ácido  $\alpha$  cetoglutárico**

**ácido glutâmico**

2- **Via glutamina sintetase (GS) e glutamato sintase (GOGAT)**, que a partir do ácido glutâmico, resulta no aminoácido glutamina e depois se tem a última reação, que a partir da glutamina produz, duas moléculas do aminoácido glutamato.

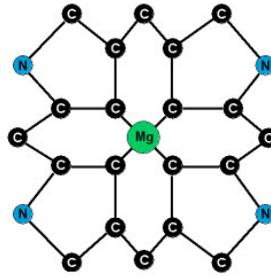


Ressalta-se que a segunda via, por meio das duas reações, constitui via preferencial para introdução de  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ , em aminoácidos, pelas plantas. A enzima sintetase glutâmica é favorecida em razão de sua maior afinidade pelo  $\text{NH}_3$ , em relação à enzima desidrogenase glutâmica. Entretanto, em plantas que

apresentam excesso de  $\text{NH}_3$ , a primeira via desidrogenase glutâmica torna-se importante, uma vez que incorpora  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  em radicais  $\alpha$  cetoglutárico, dando a formação do ácido glutâmico. Esses radicais  $\alpha$  cetoglutárico são provenientes, principalmente, da respiração de carboidratos nos mitocôndrios. Infere-se, portanto, que as plantas, como mecanismo de defesa, intensificam o processo respiratório, consumindo mais carboidratos para a produção de radicais ácidos que incorporarão  $\text{NH}_4^+$ , dando a formação à aminoácidos. As plantas nesta situação acabarão produzindo mais proteína, em detrimento dos carboidratos e seus derivados, resultando disso uma série de distúrbios relacionados ao excesso de N metabolizado, como: desequilíbrio entre a parte aérea e raízes; excesso de crescimento vegetativo em relação à produção; menor resistência à seca; acamamento; suculência dos tecidos; menor resistência ao transporte (frutas); menor conteúdo de açúcar; etc. Assim, o N metabolizado é incorporado em diversos compostos orgânicos, ricos em N, além dos aminoácidos, como as amidas (glutamina, 2N/5C e asparagina, 2N/4C) e ureídeo (ácido alantóico, 4N/4C), entre outros.

Pelo processo conhecido como transaminação, por meio de enzimas denominadas aminotransferases ou transaminases, o grupo amino do ácido glutâmico ou de outro aminoácido pode ser transferido para outros radicais  $\alpha$  ceto ácidos, dando formação a outros aminoácidos ( $\text{N/C} > 0,4$ ). Uma vez formados os 20 ou 21 aminoácidos protéicos, pode ocorrer a síntese de proteínas. O processo ocorre nos ribossomas e exige: tRNA; mRNA; ATP;  $\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{Mn}^{2+}$ ;  $\text{K}^+$  e os 20-21 aminoácidos para a formação dos polipeptídios (proteínas). De acordo com o código genético do DNA, diferentes proteínas e outros compostos nitrogenados (bases nitrogenadas, coenzimas, pigmentos, vitaminas) podem ser sintetizados.

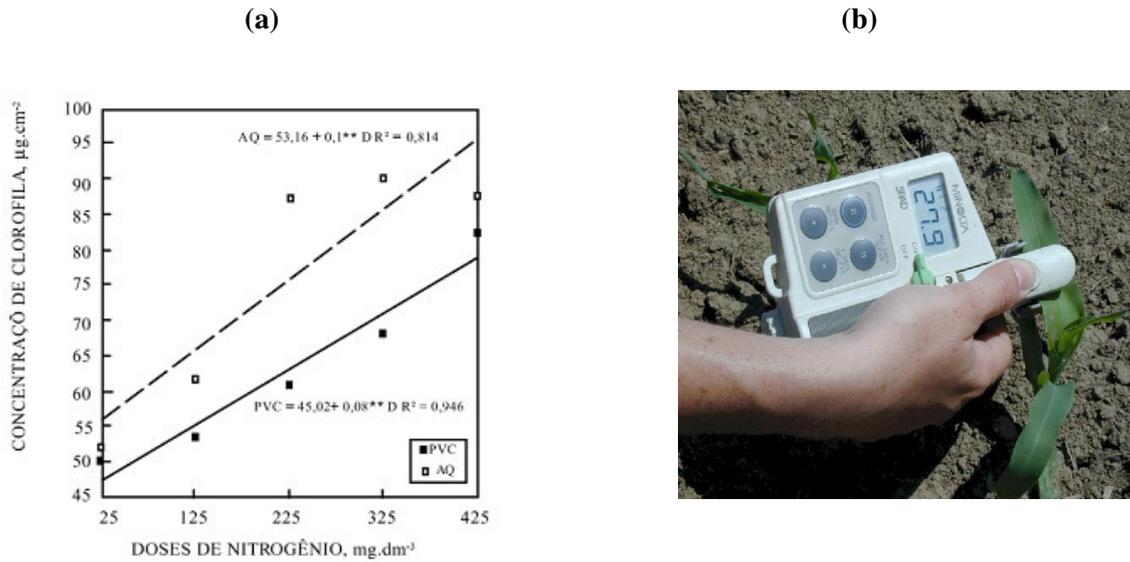
Percebe-se que o nitrogênio, após a sua metabolização, encontra-se na planta quase todo na forma orgânica (90%), e assim apresentando como função principal a estrutural, como constituinte de compostos orgânicos como a clorofila (Figura 36). Portanto, a aplicação de N incrementa linearmente o teor de clorofila das folhas, a exemplo do tomateiro cv. Santa clara (Figura 37a). E o aumento do teor de clorofila, deixa a folha com o verde mais intenso e isto poderá ser medido/estimado com clorofilômetro (Figura 37b).



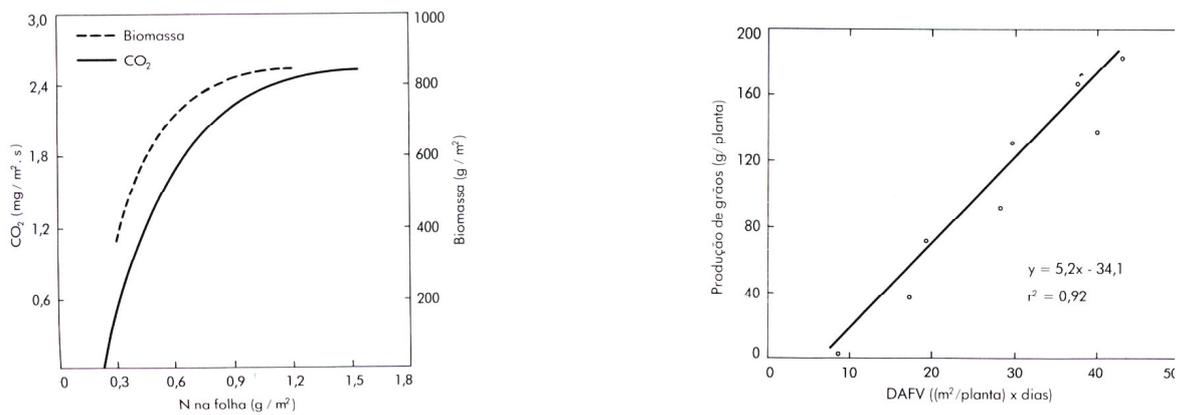
**Figura 36.** Esquema ilustrando o pigmento da clorofila (exemplo típico de quelado natural com Mg na parte central do composto)

As pesquisas avaliando os efeitos do nitrogênio nas plantas, na maioria das vezes, apontam aumento da biomassa vegetal, com reflexos no aumento da capacidade fotossintética da planta, medida pela assimilação do  $\text{CO}_2$ , e também mantendo a folha verde por mais tempo, e a fotossíntese ativa, proporcionando maior produção de grãos (Figura 38) (Wolfe et al., 1988), uma vez que se têm espigas maiores com maior número de grãos (Figura 39) (Below, 2002). Este maior número de grãos está em função da menor taxa de aborramento.

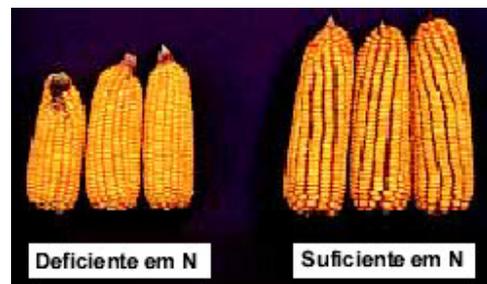
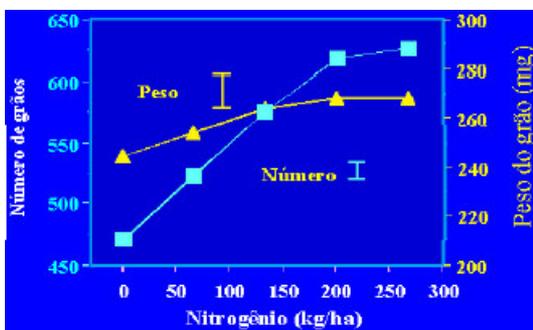
Este efeito do N, no incremento da fotossíntese, pode ser explicado pela participação deste nutriente na síntese de clorofila, conforme dito anteriormente, e também pelo seu papel na síntese das enzimas PEPC e Rubisco (fosfoenolpiruvato carboxilase e ribulose 1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase, respectivamente), que participam da fixação do  $\text{CO}_2$  atmosférico. Ranjith et al. (1995) verificaram, em variedades de cana-de-açúcar que, quando o conteúdo foliar de N aumentou de 50 para 97  $\text{mmol m}^{-2}$ , a atividade das enzimas PEPC e Rubisco e o conteúdo de clorofila também praticamente dobraram.



**Figura 37.** Efeito do N no incremento da clorofila do tomateiro cultivado em dois solos (PVC e AQ) (Guimarães et al., 1999) (a) e clorofilômetro que estima o teor de clorofila (índice SPAD) (b)



**Figura 38.** Taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  e produção de biomassa em função do conteúdo foliar de N do milho (a) e relação entre a produção de grãos e a duração da área foliar verde (DAFV) no milho, no período de 63 a 125 dias após o plantio (b) (Wolfe et al., 1988)



**Figura 39.** Efeito do N no número e peso de grãos de milho e espigas em nível de deficiência e suficiência de N. Notar que a ponta das espigas com deficiência de N tem número de fileiras reduzido (Below, 2002).

Yamazaki et al. (1986) verificaram que em milho (planta C4), o N é um fator essencial para que a luz estimule a produção do mRNA para a síntese da PEPC e Rubisco.

Por outro lado, como a deficiência de N reduz o crescimento, a utilização de assimilados pela planta é reduzida e maiores quantidades de carbono podem ser desviadas para a formação de amido (Ruffy Jr. et al., 1988). Se o acúmulo de amido no cloroplasto for excessivo, a fotossíntese pode ser seriamente afetada, por dificultar a chegada do CO<sub>2</sub> aos sítios de carboxilação da RubisCO (Guidi et al., 1998).

Assim, o nitrogênio desempenha um papel importante para o crescimento e produção das culturas, participando de diversos processos fisiológicos vitais para o ciclo de vida das plantas (Tabela 19).

O N, em quantidades adequadas, pode favorecer o crescimento da raiz, devido ao fato de que o crescimento da parte aérea aumenta a área foliar e a fotossíntese e, com isso, maior fluxo de carboidratos para a raiz, favorecendo o seu crescimento (Tabela 20). Um aspecto visual do sistema radicular da cevada indica o efeito positivo do N, verificado na parte da raiz em que o fertilizante esteve em contato (Figura 40). Na maioria das culturas observa-se alta resposta a aplicação do nitrogênio. No maracujazeiro, observa-se, a importância da irrigação adequada para maior efeito do N na produção (Figura 41).

**Tabela 19.** Resumo das principais funções do nitrogênio nas plantas (Malavolta et al.,1997)

Estrutural	Constituinte de enzimas	Processos
Aminoácidos e proteínas	Todas	Absorção iônica
Bases nitrogenadas e ácidos nucleicos		Fotossíntese
Enzimas e coenzimas		Respiração
Vitaminas		Multiplicação e diferenciação celulares
Glico e lipoproteínas		Herança
Pigmentos (clorofila)		

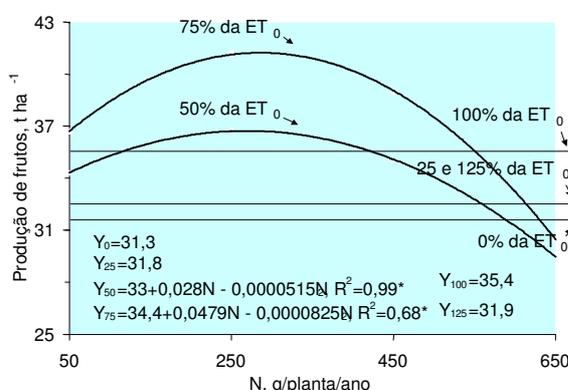
**Tabela 20.** Efeito do nitrogênio no crescimento radicular de híbridos de milho

Híbridos	N aplicado kg ha <sup>-1</sup>	Crescimento da raiz cm/10 <sup>2</sup> .s
P 3732	0	2,4
	227	3,5
B73 x Mo17	0	2,7
	227	5,3

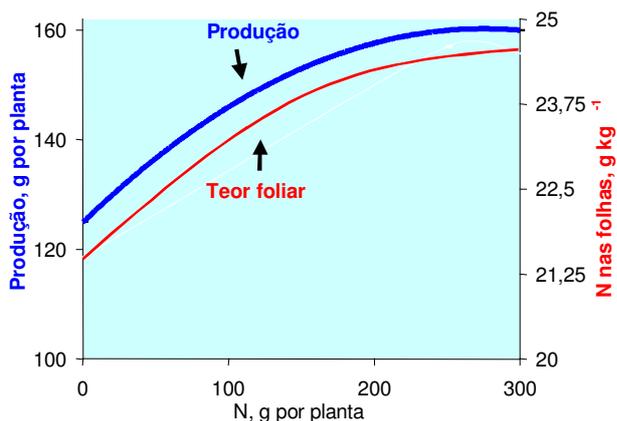


**Figura 40.** Modificação no sistema radicular de cevada pelo suprimento de 1mL de nitrato na parte mediana de um eixo radicular por 15 dias; o restante da raiz que recebeu apenas 0,01 mM de nitrato (Drew & Saker, 1975, citados por Marschner, 1995).

Calvache & Reichardt (1996) também verificaram, que no feijão e no trigo, a irrigação deficitária influi na menor absorção de N do fertilizante. No citros, a aplicação do N refletiu na mesma proporção no teor de N na folha e na produção (Figura 42).



**Figura 41.** Produção de frutos do maracujazeiro-amarelo em função de doses de nitrogênio sob lâminas de irrigação (% da ET<sub>0</sub>) (Carvalho et al., 2000).



**Figura 42.** Produção de citros em função de doses de N e o teor foliar de N (Adaptado Malavolta et al., 1997)

#### 4.4. Exigências nutricionais das culturas

A exigência nutricional é a quantidade de nutrientes acumulados na planta inteira durante seu ciclo de produção. Para contabilizar a exigência nutricional (EN) de uma cultura, é necessário considerar os nutrientes absorvidos pela planta inteira e não somente a parte colhida, ou seja,  $EN (kg ha^{-1}) = \text{teor do nutriente na planta } (\% = g kg^{-1} \times 10) \times \text{matéria seca da planta inteira } (kg ha^{-1})$ . Normalmente, o incremento da produção da cultura implicará aumento da quantidade de nutrientes acumulados pela planta, ou melhor, a exigência nutricional. Segundo Grove (1979), existe uma relação linear entre a produção de grãos e o acúmulo de N na parte aérea do milho, em diferentes locais (Brasil, Nova Iorque, Porto Rico, Nebraska). Entretanto, o maior acúmulo de nutrientes, como o P, não indica que as plantas são mais ou menos eficientes, uma vez que híbridos por meio de adaptações genéticas podem se desenvolver e produzir bem com menor quantidade do nutriente, ou seja, plantas com alta quantidade deste nutriente podem não ser mais produtivas e vice-versa (Machado, 2000) (*ver detalhes no item eficiência de uso de nutrientes*).

Logo, como os teores de nutrientes nos tecidos e a produção de matéria seca das culturas, são distintas, espera-se que a exigência nutricional seja específica para cada cultura.

##### a) Extração e exportação de nutrientes

Cerca de 60% dos fertilizantes nitrogenados produzidos são destinados exclusivamente para atender exclusivamente as exigências nutricionais dos cereais (milho, arroz e trigo) (Ladha et al., 2005). Pela literatura, observa-se variação no total de N exigido ou acumulado pelas culturas (Tabela 21).

Dentre as estudadas, observa-se que o cafeeiro e a soja são as culturas que mais extraíram nitrogênio, atingindo 253 e 181 kg para uma produção de 2,0 e 2,4 t de produção, respectivamente. A soja e o feijão são as culturas que mais exportam N pelos grãos na época da colheita, atingindo 63,3 e 47 kg t<sup>-1</sup> de grãos produzidos.

Entretanto, considerando a necessidade absoluta, isto é, a quantidade total de nutrientes para a produção de 1 tonelada de produto agrícola (grãos), o cafeeiro e o feijoeiro mostram-se mais exigentes em N, necessitando 127 e 110 kg de N para cada t de produto colhido, respectivamente.

Enquanto a exportação (E) refere-se aos nutrientes retirados da lavoura junto com a colheita, ou seja,  $E (kg t^{-1}) = \text{acúmulo de nutriente mobilizado nos grãos } (kg) \times \text{matéria seca da parte exportada } (t)$ .

Normalmente, após a colheita de culturas anuais, parte dos nutrientes são exportados no produto colhido (grãos), e o restante fica na área agrícola, na forma de restos culturais (raiz, caule e folhas), enquanto em plantas perenes, pouco dos nutrientes são exportados, em relação ao que fica imobilizado na planta inteira. Entretanto, em culturas como o milho para silagem, é exportada a planta inteira, exceto as raízes, e assim a maior parte dos nutrientes acumulados na planta são exportados.

**Tabela 21.** Exigências de nitrogênio das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida	N acumulado da planta		N requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(3)</sup>
		t ha <sup>-1</sup>	Parte da planta	Total <sup>(2)</sup>	
kg ha <sup>-1</sup>					
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Parte reprodutiva (semente)	1,3	29 (22,3) <sup>1</sup>	84	65
	Parte vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7(m.s.)	49		
	Raiz	0,5 (m.s.)	6		
<b>Soja</b>	Grãos	2,4	152 (63,3)	181	75
	Caule, ramos e folhas	5,6 (m.s.)	29		
<b>Feijão</b>	Vagem	1	47 (47)	110	110
	Caule	0,4	8		
	Folhas	1,2	53		
	Raiz	0,1	2		
<b>Milho</b>	Grãos	5,0	67 (13,4)	117	23
	Colmos, folhas	4,5	50		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	45 (15)	103	34
	Colmos	2 (m.s.)	15		
	Folhas	2 (m.s.)	15		
	Casca	1	8		
	Raiz	1 (m.s.)	20		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	50 (16,7)	70	23
	Palha	3,7	20		
<b>Perene e/ou semiperene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	90 (0,9)	150	1,5
	Folhas	25	60		
<b>Café</b>	Grãos (coco)	2	33 (16,5)	253	127
	Tronco, ramos e folhas	-	220		

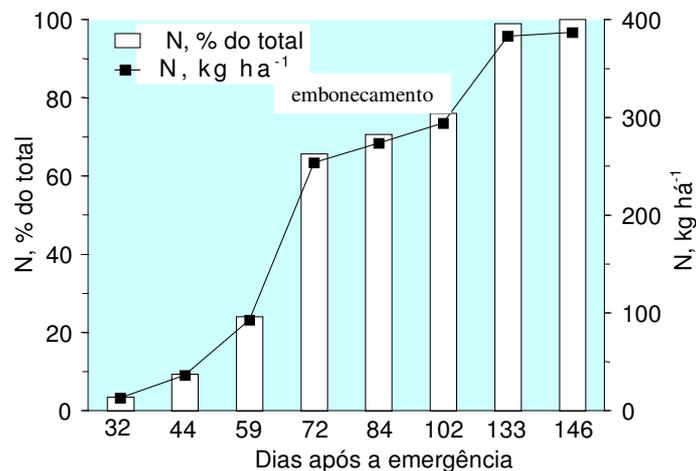
<sup>(1)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (kg t<sup>-1</sup>): N acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(2)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de N da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: N acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

## b) Marcha de absorção

Outro ponto tão importante no estudo da exigência nutricional das culturas, como a definição da quantidade de nutrientes, é conhecer com precisão em quais épocas do seu estágio de crescimento/desenvolvimento, a cultura apresenta tal exigência nutricional, uma vez que a extração dos nutrientes do solo pelas plantas, ao longo de seu crescimento, varia com o tempo de cultivo.

Assim, para as culturas em geral, nos seus estádios produtivos, a curva que descreve a extração dos nutrientes em função do tempo é uma sigmóide, da mesma forma que ocorre com a curva de acúmulo de matéria seca. Desse modo, quando a planta é jovem, a acumulação de nutrientes é pequena, bem como o acúmulo de matéria seca; em seguida, tem-se um aumento “abrupto” no acúmulo de matéria seca e, portanto, na absorção de nutrientes, descrevendo uma curva logarítmica; no período final de maturação fisiológica, há uma fase de estabilização, em que a absorção de nutrientes é pequena ou até nula como no milho (Figura 43).

Entretanto, considerando a necessidade absoluta, ou melhor, a quantidade total de nutrientes para a uma tonelada de produto agrícola (grãos), o cafeeiro e o feijoeiro mostram mais exigente em N, necessitando 127 e 110 kg de N para cada t de produto colhido, respectivamente.

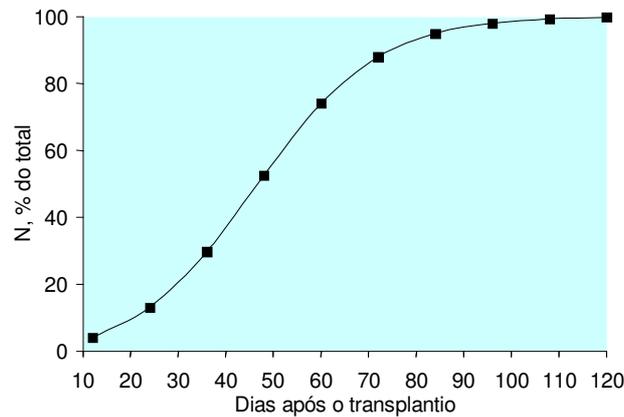


**Figura 43.** Marcha de absorção do nitrogênio pela cultura do milho (Adaptado de Flannery, 1987).

Especificamente, para o milho, nota-se baixa acumulação de N (9%) até os 44 dias após a semeadura; em seguida, a taxa de acumulação deste nutriente é praticamente linear com o tempo, atingindo o máximo aos 133 dias da semeadura. Estes resultados indicam a alta exigência do milho ao nitrogênio com tempo de cultivo. Cabe salientar que a cultura do milho, mesmo nos estádios iniciais de crescimento (4-5

folhas), tem indicado resposta positiva em termos de produção à aplicação de N, visto que este nutriente tem relação fisiológica na definição do número potencial de óvulos por espiga.

No caso de hortaliças como o tomate, tem-se acumulação lenta até próximo aos 40 dias e seguida de uma rápida no período de 40 aos 80 dias e a partir deste período, tem-se absorção lenta até atingir os 120 dias do transplântio (Figura 44) (Adaptado de Fayad et al., 2002).



**Figura 44.** Absorção de N pela cultura do tomate (cv. Santa clara) cultivado em condições de campo (Adaptado de Fayad et al., 2002).

Estas informações têm um aspecto prático muito importante, relacionado ao momento da aplicação do nutriente, na adubação de cobertura com N, devendo ser realizada nos períodos iniciais que antecedem a alta absorção. Assim, o conhecimento da melhor época de aplicação do nitrogênio e o uso de genótipos com alta habilidade para absorção do nutriente poderá aumentar a eficiência agrônômica da adubação nitrogenada. A maior eficiência do uso do N, torna-se importante pelo fato que a taxa de recuperação do N pelas culturas, no primeiro ano, é no máximo de 50%, e após isso diminui drasticamente (< 7% em seis colheitas sucessivas) (Ladha et al., 2005).

#### 4.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

##### a) Deficiência

Comprovando-se tratar de desordem nutricional, no caso da deficiência de nitrogênio, o sintoma típico de deficiência é um amarelecimento da folha por falta de clorofila, que deixa de ser sintetizada, ou é degradada (hidrólise e redistribuição de proteínas), para a liberação do nitrogênio para suprir a deficiência nas folhas novas. O sintoma aparece nas folhas mais velhas devido ao transporte do nitrogênio dessas folhas

para folhas mais novas ou para frutos em formação. A sintomatologia é semelhante nas culturas com pequenas diferenças (Figura 45). Entretanto, com o tempo, tem-se agravamento da deficiência, com clorose atingindo todas as folhas, seguida de necrose.

Existem outros sintomas de deficiência de nitrogênio nas plantas em geral:

- a) Pequeno ângulo de inserção entre folhas e ramos;
- b) Maturidade e senescência abreviada (pela redução da citocianina, responsável pela permanência da cor verde dos tecidos por mais tempo);
- queda prematura de folhas;
- c) Diminuição de flores e dormência de gemas laterais
- d) Produção reduzida;
- e) Cloroplastos pequenos;
- f) Baixo conteúdo de clorofila e proteínas;
- g) Altos teores de açúcares;
- h) Aumento da pressão osmótica.

#### **a) Excessos**

Os principais aspectos de excesso de nitrogênio absorvido e metabolizado estão relacionados ao desvio de carboidratos para as proteínas, como já explicado anteriormente, que promove excesso de desenvolvimento vegetativo da parte aérea, em detrimento do reprodutivo (produção) (talvez por desequilíbrio dos fitormônios) e também, causando aumento da relação parte aérea/raiz, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular, diminuindo a capacidade de resistência das plantas a períodos secos (veranicos) e, ainda, o acamamento das plantas. Na cultura do milho, o excesso do nutriente é também verificado na fase reprodutiva, onde os cabelos da espiga permanecem verdes.

É pertinente salientar que o excesso de  $\text{NH}_4^+$  na planta que provocaria toxidez, pode ser agravado pela deficiência de K, visto que este último é importante para a assimilação do nitrogênio reduzido ( $\text{NH}_4^+$ ), formando aminoácidos (Dibb & Welch, 1976).

Entretanto, o maior controle genético em culturas anuais, pode contribuir para à capacidade das cultivares de porte baixo em repartir mais N para o grão e menos para colmos e folhas. Em consequência, a responder à adubação nitrogenada sem acamar.

Além disso, o excesso da aplicação do nitrogênio pode promover problemas na planta, pelo efeito da salinidade do fertilizante utilizado e, também, danos ao meio ambiente, devido à alta mobilidade do nitrato no perfil do solo, que pode atingir o lençol freático.

Além disso, há outros efeitos negativos do excesso do N na qualidade de produtos agrícolas, como nas frutas, em que aumento da suculência diminui o armazenamento e a resistência ao transporte; no café, prejudica a qualidade da bebida; na cana-de-açúcar, reduz o teor de sacarose. No algodoeiro, o excesso de N causa prejuízo na abertura das maçãs. Em hortaliças, existem algumas indicações que o excesso de nitrato, ao ser reduzido a nitrito pode causar toxicidade nos seres humanos. Na corrente sanguínea o  $\text{N-NO}_2^-$  oxida o íon ferroso presente na hemoglobina a íon férrico, formando a metahemoglobina. Este composto impede o transporte de  $\text{O}_2$ , entre tecidos (Keeney, 1982). Considera-se a metahemoglobiemia moderada, ou seja, menos que 30% da hemoglobina oxidada, que causa náuseas e cefaléia, e mais que 50% é severa e pode ser fatal (Boink & Speijers, 2001).

Em resumo têm-se os seguintes sintomas de excessos:

#### **Sintomas (visíveis)**

- a) Coloração verde escura;
- b) Folhagem abundante;
- c) Acamamento;
- d) Atraso na maturação;

#### **Outros sintomas**

- a) Sistema radicular pouco desenvolvido;
- b) Baixo transporte de açúcares para raízes e tubérculos;
- c) Aumento da suculência dos tecidos.

É pertinente salientar, que em estudos em solução nutritiva com níveis alto de N na forma de amônio, resulta em sintomas de toxidez, a exemplo em plantas de estíloides (clorose e por lesões necróticas das folhas, do ápice em direção à base, e por queda das folhas inferiores) (Amaral et al., 2000), especialmente na parte aérea das plantas, onde ele é tóxico em concentrações relativamente baixas (Hageman & Below, 1990), podendo desacoplar a fotofosforilação (Trebst et al., 1960), inibir a síntese de clorofila (Bogorad, 1976) e promover a degradação de cloroplastídios (Puritch & Barker, 1967) e de proteínas (Barker et al., 1966).

DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA		NUTRIENTE: NITROGÊNIO
FOTOS		DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
 <p>(a) (b)</p>		<p>Lâminas foliares uniformemente verde-claras a amarelas das folhas mais velhas (Foto 1ª – folha a esquerda deficiente de N e a direita normal); Pontas e margens das folhas mais velhas tornam-se necróticas prematuramente, colmos ficam mais curtos e mais finos; atraso no desenvolvimento vegetativo (foto 1b – planta a esquerda com deficiência e a direita planta normal). Nota-se efeitos generalizados sobre toda a planta.</p>
<p><b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b></p>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>Amarelecimento das folhas mais velhas, com mais intensidade na ponta para a base em forma de "V" que progride para o secamento (necrose) ao longo da nervura principal (foto 2a); e têm-se colmos finos e com reduzido crescimento da planta (foto 2b).</p>
<p><b>Foto 2. MILHO</b></p>		
 <p>(a) (b) (c)</p>		<p>Amarelecimento nos folíolos das folhas mais velhas (Figura 3a). No estágio avançado, tem-se a necrose das folhas mais velhas (foto 3b). Nesta fase podem aparecer áreas esbranquiçadas em várias partes do limbo foliar.</p> <p>A falta de N, reduz drasticamente o desenvolvimento da planta (foto 3c – à direita planta normal, tratamento completo e a direita planta com deficiência de N).</p>
<p><b>Foto 3. FEIJÃO</b></p>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>A clorose uniforme ocorre nas folhas mais velhas dos ramos, sendo que estas caem prematuramente (foto 4a)</p> <p>Folhas novas verde-pálidas, tornando-se amarelo-esverdeadas quando crescem; vegetação rala; ausência ou poucos frutos de cor pálida (foto 4b).</p>
<p><b>Foto 4. CITRUS</b></p>		
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>		

Figura 45. Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de N em diversas culturas.

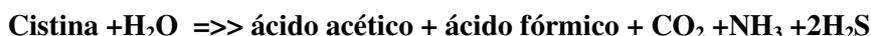
Capítulo 5 ENXOFRE

5.1 Introdução

A concentração de enxofre nos solos varia de 0,1% em solos minerais até 1% em solos orgânicos; entretanto, grande parte deste elemento está na forma orgânica (60-90% do total), ou seja, S-aminoácidos, S-fenóis, S-carboidratos, S-lipídeos, S-húmus). Desse modo, como a maior parte do S do solo é orgânico, os processos microbiológicos nos solos tornam-se importantes no estudo deste nutriente. Por outro lado, o reservatório de S do solo é a matéria orgânica. Solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica, podem apresentar pouca capacidade de suprir as plantas com esse elemento.

O enxofre, como o nitrogênio, sofre muitas transformações no solo (imobilização/mineralização e oxidação/redução), por meio principalmente dos microorganismos e, também, do manejo do solo (drenagem, porosidade) que pode afetar a química do elemento (estado de oxidação).

Durante o processo de mineralização, o primeiro mineral formado é o H<sub>2</sub>S, principalmente, conforme a equação abaixo:



Em condições aeróbicas, o enxofre do H<sub>2</sub>S é oxidado até SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, ao passo que em meio anaeróbico, o H<sub>2</sub>S produz enxofre elementar (S) (Figura 46).

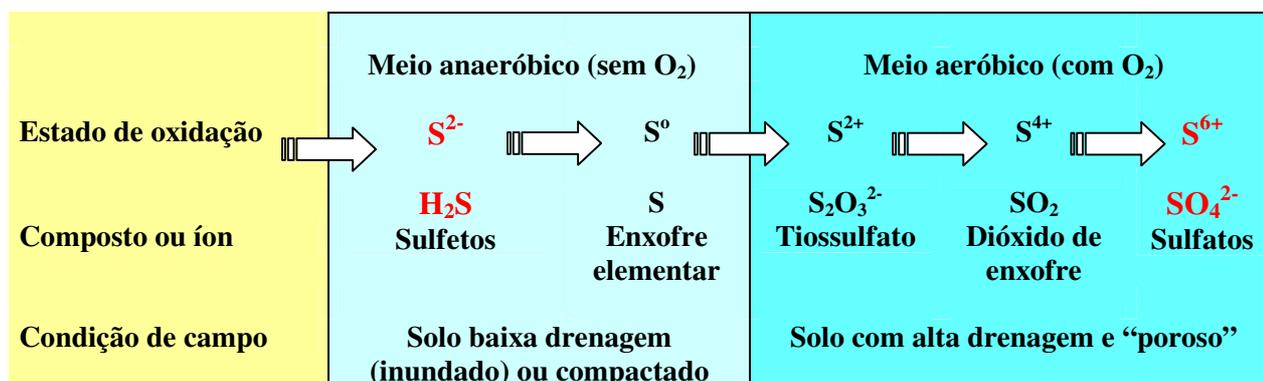
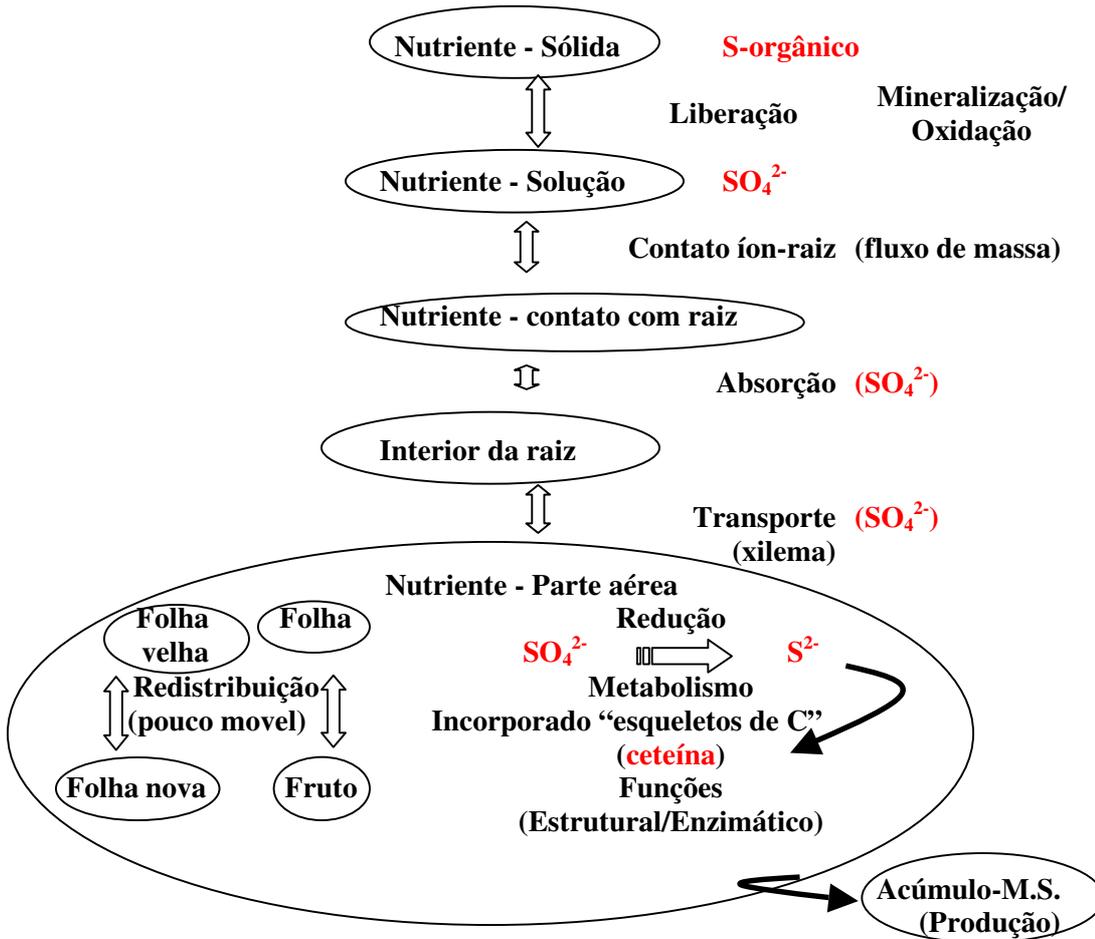


Figura 46. Fluxo do estado de oxidação do enxofre no solo.

Observa-se que a maior parte do enxofre no solo está “preso a um composto orgânico” que, por via microbiana, é convertido a formas minerais e, em solos aerados, passa à forma disponível para as plantas (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Assim, conhecer os fatores que afetam a atividade da microbiota do solo, que favoreçam o processo da mineralização (C/S <200) e também um manejo físico do solo adequado que favoreça maior aeração, incrementa o S-disponível e, conseqüentemente, a absorção e a nutrição da planta.

Em solos que sofrem adições de sulfato, seja pelo processo da mineralização, seja da adubação (superfosfato simples, sulfato de amônio) e gessagem (sulfato de cálcio), o mesmo, por apresentar alta mobilidade no solo, pode sofrer também perdas consideráveis pelo fenômeno da lixiviação.

No estudo do enxofre e dos demais nutrientes no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre, a solução do solo; a raiz e a parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até a sua incorporação na matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 47).



**Figura 47.** Dinâmica do enxofre no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

Para isso, existem vários processos (liberação da fase sólida para a líquida; contato íon-raiz; absorção; transporte; redistribuição) que governam a passagem do nutriente nos diferentes compartimentos para ser devidamente metabolizado, desempenhando suas funções específicas na vida do vegetal para propiciar o acúmulo de matéria seca na planta. Assim, para maximizar a conversão do nutriente aplicado em produto agrícola, é preciso satisfazer à exigência nutricional da planta, ou seja, atender, em termos

quantitativos, os nutrientes (macro e micro) em todos os estádios de crescimento/desenvolvimento para atingir a produção agrícola esperada (máxima econômica). Porém, esta exigência nutricional é específica em cada cultura.

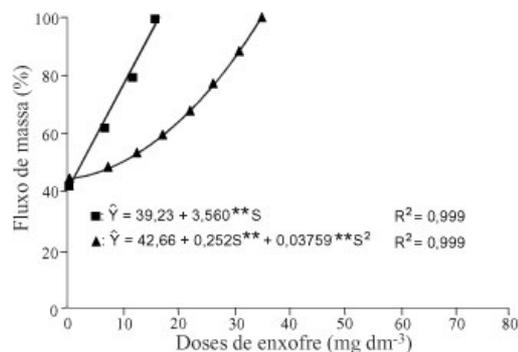
## 5.2 Absorção, transporte e redistribuição do enxofre

### a) Absorção do enxofre

Antes da absorção, o contato S-raiz, ocorre por fluxo de massa, ou seja, é um processo que depende da taxa de movimento de água no sistema solo-planta. Assim, quanto maior a concentração do elemento na solução e o volume de água absorvido, maior será o contato íon-raiz, que favorecerá, em seguida, o processo de absorção propriamente dito.

Silva et al. (2002), inicialmente estabeleceram a dose mínima necessária em cada solo para atingir o ponto em que o S absorvido pela planta passa a ser transportado no solo exclusivamente por fluxo em massa. Determinou-se, também, a contribuição porcentual do fluxo em massa e da difusão para o transporte de S até as raízes. Como os mecanismos (fluxo de massa e difusão) atuam de forma complementar até atingir tal ponto, foram analisados apenas os dados referentes ao fluxo em massa.

A contribuição da difusão pode ser obtida subtraindo-se de 100 a porcentagem de S transportado por fluxo em massa. Ajustaram-se equações quadrática no solo de Lassance, e linear no solo de Paracatu (Figura 48). Observou-se que na dose 0 mg dm<sup>-3</sup> de S, o fluxo em massa transportou apenas 39,2 e 42,7 % do S absorvido pelas plantas nos solos de Paracatu e Lassance, respectivamente



**Figura 48.** Contribuição porcentual do fluxo em massa na absorção de S por plantas de soja, em função das doses de S aplicadas em amostras dos solos de Paracatu (■) e Lassance (▲). (Silva et al., 2002).

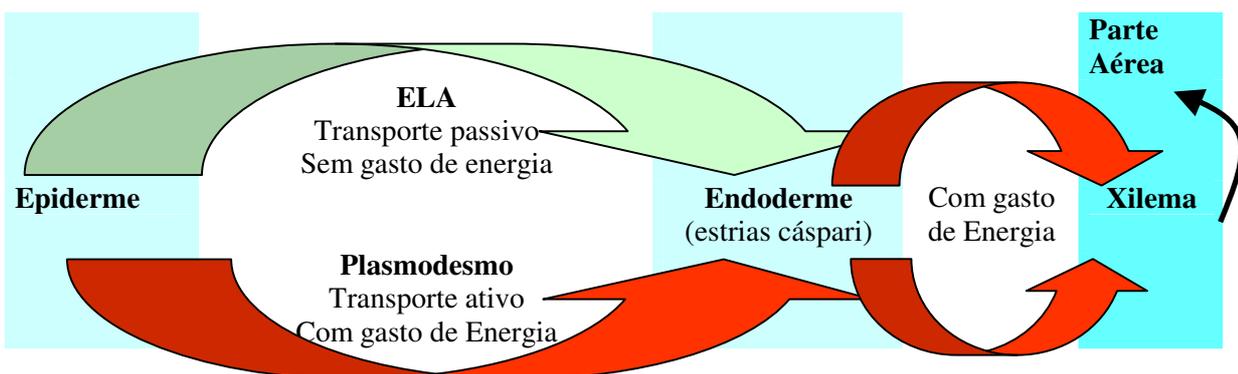
A principal forma de enxofre absorvido pelas plantas é a do sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  pelas raízes. Entretanto, como destacaram Mengel & Kirkby (1978), a partir de pesquisas com milho e girassol, existem evidências de que as plantas utilizam o enxofre na forma gasosa, o  $\text{SO}_2$  atmosférico, para atender a parte de suas necessidades. Nesse caso, as plantas captam por meio dos estômatos e depois o redistribuem para a planta inteira. O enxofre pode também ser absorvido na forma orgânica (aminoácidos: cistina e cisteína).

Com relação ao  $\text{SO}_4^{2-}$ , as evidências são de que o mesmo é absorvido ativamente pelas raízes, contra um gradiente de concentração. No processo de absorção, o enxofre é pouco afetado pelas variações no valor pH; entretanto, existem indicações que demonstram maior absorção em pH próximo de 6,5.

### b) Transporte do enxofre

Logo após a absorção do enxofre, desencadeia-se o processo de transporte, que ocorre de forma semelhante à forma absorvida, ou seja, predominantemente como sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Entretanto, pequena proporção pode ser transportada na forma orgânica, porque uma fração é metabolizável para suprir esse órgão.

O transporte do S da epiderme até a endoderme pode ocorrer de forma passiva pelo ELA (parede celular e espaços intercelulares) ou pelo interior das células, de forma ativa, graças aos seus prolongamentos citoplasmáticos (plasmodesmos). Da endoderme até o xilema, ocorre, necessariamente, um transporte ativo, devido à barreira existente na endoderme (estrias de Caspary). Após atingir o xilema, tem-se o transporte à longa distância, de forma passiva, até a parte aérea da planta (Figura 49).



**Figura 49.** Esquema do processo de transporte do enxofre nas plantas.

### c) Redistribuição do enxofre

O movimento do enxofre nas plantas ocorre, basicamente, durante o transporte para a parte aérea, via xilema, (direção acrópeta=base da planta para cima), conforme explicado anteriormente. O movimento do enxofre basípeta (de cima para baixo), ou seja, a redistribuição, é muito pequena, sendo considerado, portanto, pouco móvel na planta. Oliveira et al. (1995) observaram que apenas 27% do S absorvido pela folha, foi redistribuído para o restante da parte aérea e raízes do feijoeiro.

Salienta-se, ainda, que a forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , praticamente, não é detectada na seiva do floema. A glutatona seria a principal forma de S reduzido transportada no floema (Garsed & Read, 1977). Se houver deficiência do enxofre no solo, a planta, não tendo como remobilizá-lo, em quantidade suficiente, por exemplo, de uma folha velha, a sintomatologia de deficiência apareceria na folha nova, o que será descrito com detalhes no final deste capítulo.

## 5.3 Participação no metabolismo vegetal

### a) Redução assimilatória do sulfato

De forma semelhante ao nitrogênio, o enxofre que é predominantemente absorvido na forma oxidada,  $\text{SO}_4^{2-}$  (+6), precisa ser previamente reduzido a sulfeto  $\text{S}^{2-}$  (-2), para posteriormente ser incorporado aos compostos orgânicos. Para isso, exige energia (14 ATP) e um poder redutor (transferência de oito elétrons). Portanto, essa reação exige alto consumo de energia respiratória. Entretanto, existem casos em que o sulfato não precisa ser reduzido, sendo incorporado em certos compostos orgânicos (sulfolipídeos ou polissacarídeos).

O processo de redução do sulfato ocorre, principalmente, durante o período luminoso, e as enzimas que participam das reações estão localizadas nas membranas dos cloroplastos, tendo-se a ferredoxina como doador de elétrons. Em tecidos não-clorofilados, como as raízes, este processo de redução do sulfato ocorre nos plastídios, tendo NADPH como doador de elétrons; entretanto, com velocidade bem inferior àquela que ocorre nos cloroplastos.

Assim, o processo de redução do sulfato pode ser dividido em quatro etapas:

(a) O primeiro passo para a redução do sulfato consiste na sua ativação ou formação de sulfato ativo. Ocorre inicialmente uma reação entre o  $\text{SO}_4^{2-}$  e o ATP, mediada pela enzima ATP-Sulfurilase, que resulta na substituição de um radical pirofosfórico (P-P) do ATP, por sulfato. Forma-se, dessa forma, a adenosina fosfo-sulfato (APS) ou “sulfato ativo”.

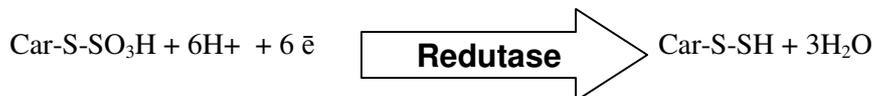


(b) Os grupos sulfúricos do APS são transferidos para um complexo, carregador de grupos sulfidrílicos, por meio da atuação da APS transferases, segundo o esquema:



Assim, tem-se a incorporação do  $\text{SO}_3$  ao complexo carregador de SH (em substituição ao H).

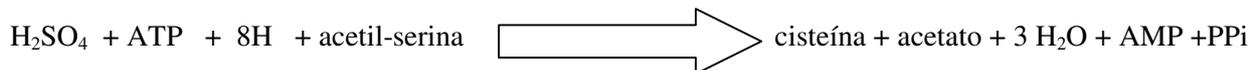
(c) o complexo carregador ( $\text{Car-S-SO}_3\text{H}$ ) sofre redução até S-H, recebendo elétrons fornecidos pela ferredoxina, mediado pela ação de uma redutase.



(d) Posteriormente, o radical do grupo SH é transferido para a acetil serina, requerendo  $2\text{e}^-$  que origina da ferredoxina, ocorrendo, nesta etapa, a incorporação do enxofre ao composto orgânico, dando a cisteína (aminoácido com S) e regenerando-se o carregador-SH.



Em resumo, o processo de redução assimilatória do sulfato ocorre da seguinte forma:



Logo, no final da redução do sulfato, tem-se o primeiro composto estável com S, a cisteína, que se deriva ou é precursora de outros compostos orgânicos com S (S-aminoácidos; proteínas; sulfolípídeos e coenzimas). Enquanto, que pequena quantidade de S não reduzido (éster de sulfato) é componente dos sulfolípídeos presente em todas as membranas., assim, importante no transporte iônico nas células das raízes, relacionado com a tolerância a salinidade.

As proteínas são os compostos orgânicos, às quais a maior parte do S (e também o N) se incorpora. Assim, nas proteínas, normalmente são encontrados cerca de 34 átomos de N para cada átomo de S.

A maior parte do enxofre que foi reduzido nas plantas (~90%) faz parte dos aminoácidos essenciais; a cisteína e metionina (-SH) (Salisbury & Ross, 1992). Estes aminoácidos entram na composição de todas proteínas, tendo função estrutural, graças à formação de ligações dissulfeto (S-S). Estas ligações atuam na estabilidade da estrutura das proteínas. Outra função é enzimática, devido à participação do grupo sulfidrílico (-SH) como grupo ativo de determinado complexo enzimático (ex. urease, sulfotransferase, coenzima A) envolvidos nas reações metabólicas e de outros compostos (vitaminas B<sub>1</sub>, H). Nesta forma, já reduzida, é que está a maior fração do enxofre das plantas.

Além disso, o enxofre faz parte de outros compostos orgânicos, que influenciam diversos processos fisiológicos importantes na vida das plantas (Marschner, 1986), tais como:

Ferredoxina – proteínas de baixo peso molecular, que contém Fe e S. Serve nas reações de oxirredução na fotossíntese; na redução de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (redutase do nitrito); na fixação biológica do N, na redução do SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> e na síntese do glutamato.

Coenzimas (CoA) que estão ligadas ao metabolismo de carboidratos, gorduras e proteínas, na respiração.

Participa do SH em reações enzimáticas, que pode conferir às plantas maior resistência ao frio.

Nitrogenase – enzima envolvida na fixação biológica do N.

Existem outros compostos que contém S, como o glutathione (agente redutor), um tripeptídeo que atua como antioxidante em vários processos de detoxificação (Droux, 2004). Os fitoquelatos são produzidos pela polimerização de glutathione, através da carboxi-peptidase. Assim, a glutathione é precursor das fitoquelatinas, que funcionam na desintoxicação de metais pesados. A produção de fitoquelatos é estimulado pela própria alta concentração do metal pesado.

Salienta-se, ainda, que a maior parte do S reduzido na planta (~90%) está na forma de glutatona, e o resto como grupos silfidrilos (tiol) (~2%), entre outros.

De forma resumida, Malavolta et al. (1997) apresentam as funções básicas do enxofre nas plantas (Tabela 22).

Certas plantas, como cebola, alho e mostarda, apresentam compostos voláteis, contendo enxofre (isotiocianato; sulfóxidos), que contribuem para o odor característico que desprende desses vegetais.

Como o enxofre participa de estruturas orgânicas nas plantas e de diversas reações enzimáticas, a sua deficiência pode trazer prejuízos também na síntese protéica, como um acúmulo de nitrogênio (N-nitrato ou N-orgânico), promovendo uma redução do teor de proteína nas plantas e no crescimento vegetal (Tabela 23).

Assim, o S está intimamente ligado ao metabolismo do N, convertendo N-aminoácidos (não-protéico) em N-protéico. Como a maior parte das proteínas está localizada nos cloroplastos, onde as moléculas de clorofila contêm grupos prostéticos, em caso de deficiências, há menor teor de clorofila, podendo apresentar uma coloração verde-pálida e até clorose.

**Tabela 22.** Resumo das funções do enxofre nas plantas (Malavolta et al.,1997).

Estrutural	Constituinte de enzima	Processos
Aminoácidos (cisteína; cistina; metionina)	Grupo sulfidrilo -S-H e ditiol -S-S- ativo em enzimas e coenzimas	Fotossíntese
Proteínas (todas)	Ferredoxina	Fixação não fotossintética de CO <sub>2</sub>
Vitaminas e coenzimas (tiamina (descarboxilação do piruvato no ciclo de krebs), biotina)		Respiração
Ésteres com polissacarídeos, forma não reduzida, faz parte dos sulfolipídeos (membranas, especialmente dos tilacóides)		Síntese de gorduras e proteínas Fixação simbiótica do nitrogênio

**Tabela 23.** Efeito do enxofre no meio sobre alguns componentes (orgânico e mineral) da folha do algodoeiro (Ergle & Eaton, 1951).

SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ppm	S- SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> g	S-orgânico %	Açúcar total %	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> %	N-orgânico solúvel %	N-proteína %	Peso fresco g
0,1	0,003	0,11	0,0	1,39	2,23	0,96	13
1,0	0,003	0,11	0,0	1,37	2,21	1,28	50
10	0,009	0,17	1,5	0,06	1,19	2,56	237
50	0,100	0,26	3,1	0,00	0,51	3,25	350
200	0,360	0,25	3,4	0,10	0,45	3,20	345

Nas leguminosas que apresentam um conteúdo maior de proteínas, o enxofre pode exercer papel fundamental para maximizar a fixação biológica do N, por meio da atividade da nitrogenase e com reflexos positivos na produção. Neste sentido, Monteiro et al. (1983), trabalhando com a leguminosa forrageira (siratro), observaram que as maiores produções de matéria seca, acúmulo de N e massa nodular ocorriam quando essa leguminosa apresentava 1,7 g kg<sup>-1</sup> S e uma relação N:S, igual a 20 (Tabela 24). As plantas desenvolvidas neste solo, sem receber aplicação de enxofre, apresentavam 0,7 g kg<sup>-1</sup> S e relação N:S de 40.

**Tabela 24.** Produção de matéria seca (M.S.), acúmulo de nitrogênio total, peso de nódulos, teor de N, S e a relação N:S na parte aérea do siratro cultivado em Areia Quartzosa em Brotas-SP (Monteiro et al., 1983).

Níveis de S kg ha <sup>-1</sup>	M.S. g por vaso	N total mg por vaso	Nódulos mg por vaso	N g kg <sup>-1</sup>	S g kg <sup>-1</sup>	Relação N:S
0	10,1	276	315	27	0,7	40
30	11,3	372	560	33	1,6	21
60	12,4	403	564	33	1,6	20
90	12,3	406	606	33	1,7	20
120	11,5	392	604	34	1,9	18

É provável que maior eficiência de uso do nitrogênio pelas plantas deve depender de um nível adequado do enxofre, indicando a importância destes nutrientes na nutrição das plantas.

Diante da exigência das plantas com relação ao enxofre para a formação de aminoácidos/proteínas, e para os processos fisiológicos das plantas, como a fotossíntese e até a resistência ao frio, as pesquisas têm indicado respostas positivas à aplicação deste nutriente em algumas culturas (Tabela 25).

Este fato torna-se mais importante ao processo de adubação convencional das culturas, no qual a aplicação do enxofre não tem sido realizada de forma adequada (uso de fertilizante concentrado à base de fórmula isenta em S), além do uso de cultivares melhorados, com alto potencial produtivo e, assim, exigência maior; redução da matéria orgânica do solo (reserva de S no solo). Isso somado, tem tornado o enxofre um nutriente limitante na produção agrícola brasileira.

**Tabela 25.** Resposta média de algumas culturas ao enxofre (Malavolta, 1996).

Cultura	Aumento da produção %
Algodão	37
Arroz	16
Café	41
Cana-de-açúcar	11
Citros	18
Feijão	28
Milho	21
Soja	24
Sorgo	10
Trigo	26

#### 5.4. Exigências nutricionais das culturas

O estudo da exigência nutricional das plantas deve refletir a extração total do nutriente do solo, respeitando a extração em cada fase do desenvolvimento vegetal, para satisfazer às necessidades nutricionais das culturas, visando à máxima produção econômica.

Salienta-se que o teor total de S na planta para crescimento/desenvolvimento ótimo é de 0,2 até mais de 1% do peso seco; entretanto, estes valores podem variar em função da cultura e de outros fatores, que serão objetos de outro capítulo (*Diagnose foliar*).

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação e a marcha de absorção deste nutriente ao longo do cultivo.

##### a) Extração e exportação de nutrientes

A extração total de enxofre é função do teor na planta e da quantidade de matéria seca acumulada. Portanto, depende da produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade no solo, do manejo da cultura, entre outros.

Quanto à espécie vegetal, nota-se variação da quantidade exigida em função das culturas (Tabela 26). Pelos resultados, das diversas culturas, observa-se que a extração total de enxofre variou de 8 (trigo) até 45 kg ha<sup>-1</sup> (cana-de-açúcar), considerando a produção obtida em um hectare. Entretanto, em valores absolutos de extração total de enxofre, observa-se alta exigência das leguminosas (feijoeiro e algodoeiro) e baixa das gramíneas (cana-de-açúcar, milho, trigo e arroz), com valores de 25-26 e 0,5-4,0 kg para cada tonelada de

produto (grãos) produzido, respectivamente. Observa-se, ainda, que existem também diferenças na exigência nutricional da soja sob diferentes cultivares, sendo que a cv. cristalina mostrou-se mais exigente em S (20%) comparada à cv. IAC 11 (Tabela 27). Portanto a exigência nutricional de S pode variar em função da cultura e também do cultivar que está sendo utilizado.

**Tabela 26.** Exigências de enxofre das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria produzida seca	S acumulado		S requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(5)</sup>
			Parte da planta	Total <sup>(4)</sup>	
		t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>		kg t <sup>-1</sup>
<b>Anuais</b>					
Algodoeiro	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	10 (7,7) <sup>(3)</sup>		25
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	22	32,5	
	Raiz	0,5	0,5		
Soja <sup>(1)</sup>	Grãos	3	6 (2,0)		7,7
	Ramas	6	17	23	
Feijão	Vagem	1	10 (10)		26
	Caule	0,4	4	26	
	Folhas	1,2	11		
	Raiz	0,1	1		
Milho <sup>(2)</sup>	Grãos	9	11 (1,2)		2,1
	Restos culturais	6,5	8	19	
Arroz	Grãos	3	5 (1,7)		4
	Colmos	2	3	12	
	Folhas	2	1		
	Casca	1	1		
	Raiz	1	2		
Trigo	Grãos	3	3 (1,0)		2,7
	Palha	3,7	5	8	
<b>semi-perene/perene</b>					
Cana-de-açúcar	Colmos	100	25 (0,25)		0,5
	Folhas	25	20	45	
Cafeeiro <sup>(1)</sup>	Grãos (coco)	2	3 (1,5)		13,5
	Tronco, ramos e folhas		24	27	

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Barber & Olsen (1969). <sup>(3)</sup> Exportação de nutrientes através dos grãos produzidos; S acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional total da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(5)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de S da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos): S acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

Este valor da exigência nutricional das culturas seria uma recomendação exata de adubação para enxofre, se o solo não tivesse capacidade de fornecimento do elemento, e as perdas com a adubação fossem nulas, conforme a equação geral:  $\text{Adubação} = (\text{Exigência Nutricional da Cultura}) - (\text{Solo fornece}) \div \text{perdas}$ . A exemplo da cultura do milho, onde a exigência nutricional em S é de  $19 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 26). Entretanto, a quantidade de S a ser aplicada na cultura é superior a esta devido especialmente as perdas entre outros fatores. Neste sentido, Khan et al. (2006), observaram que a aplicação de  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de S, proporcionou adequada nutrição do milho ( $\text{S foliar} = 4,6 \text{ g kg}^{-1}$ ) e a máxima produção.

A exportação do enxofre, caracterizada pela saída da lavoura do nutriente com o produto da colheita, é significativa. A taxa de exportação das culturas em estudo, com os produtos da colheita, atingiu em média 58% (Tabela 26), sendo que o algodoeiro e o feijoeiro são os que mais exportam 7,7 e 10 kg/t produzida, respectivamente.

É oportuno salientar que, com os lançamentos de novos cultivares/híbridos, a exigência nutricional poderá aumentar, tendo em vista a busca dos fitotecnistas, pelo aumento da densidade populacional e, também, pelo uso de doses mais elevadas de fertilizantes.

**Tabela 27.** Produção e o enxofre acumulado na parte aérea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e nos grãos ( $\text{kg por t de grão}$ ) de cinco cultivares de soja. Média de 3 locais (Mascarenhas, 1991, não-publicado).

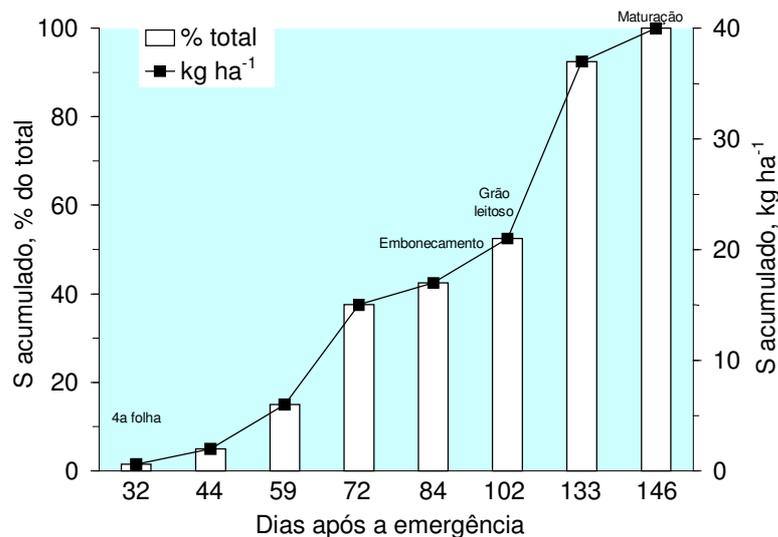
Cultivar de soja	Produção $\text{t ha}^{-1}$	S - parte aérea $\text{kg ha}^{-1}$	S - grão $\text{kg por t de grão}$
IAC 11	3,32	34	10,2
IAC 13	2,57	28	10,9
IAC 15	3,25	34	10,5
Santa Rosa	3,05	35	11,5
Cristalina	3,27	42	<b>12,8</b>
Média	3,09	35	11,3

#### b) Marcha de absorção

O estudo da marcha de absorção deste nutriente (acumulação em função do tempo de cultivo) é importante porque permite determinar as épocas em que o elemento é mais exigido e corrigir as deficiências que, porventura venham ocorrer durante o desenvolvimento da cultura.

No milho, nota-se que as exigências de enxofre variam com os diferentes estádios de desenvolvimento, sendo baixa nos estádios iniciais, com 15% da acumulação total durante os primeiros 59 dias, e, a partir daí, tem-se praticamente um incremento linear, atingindo a metade do total aos 102 dias; na

próxima etapa, até 133 dias, fase de “formação de dente”, tem-se maior taxa de absorção do S, atingindo 93% do total. No período até 146 dias, fase de maturação fisiológica, estabiliza-se a absorção até completar os 100%, no final do ciclo de produção (Figura 50). Assim, a aplicação de enxofre (na forma de sulfato de amônio) na cultura do milho, pode ser utilizada tardiamente, a partir dos 59 dias da semeadura (12 folhas), atendendo perfeitamente à exigência nutricional da cultura.



**Figura 50.** Marcha de absorção do enxofre, pela cultura do milho (Adaptado de Flannery, 1987).

### 5.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

A clorose produzida por deficiência de enxofre é muito semelhante à de deficiência de nitrogênio. A distinção pode ser feita quando se detecta no início, uma vez que a deficiência de enxofre começa pelas folhas mais novas devido à baixa mobilidade do mesmo nas plantas, e a de nitrogênio, começa pelas folhas mais velhas, o que é atribuído à alta mobilidade desse nutriente. Entretanto, com o agravamento da sintomatologia, pode ocorrer clorose distribuída de forma uniforme tanto nas folhas novas como nas velhas. No caso das leguminosas, a deficiência de S inibe mais a fixação biológica do N que a fotossíntese, podendo confundir a deficiência de S como a de N (Figura 51). A análise química das folhas permite a distinção entre deficiência de S e N. Salienta-se, ainda, que nas leguminosas normalmente, a deficiência de S ocorre nas folhas novas, quando o nível de N está adequado, entretanto, ocorre o contrário, em plantas com deficiência

de N, portanto, a deficiência de S ocorre primeiro nas folhas velhas, indicando que a sua remobilização está associada à senescência da folha, induzida pela deficiência de N (Marschner, 1995).

Nas plantas deficientes em enxofre, os níveis de  $S-SO_4^{2-}$  são muito baixos enquanto os teores de N-amídico e de  $NO_3^-$  são aumentados. Esses dados analíticos contrastam com os das plantas deficientes em nitrogênio nas quais os teores de N solúvel são deprimidos, e os  $S-SO_4^{2-}$  são normais.

Salienta-se que a relação  $S_{\text{inorgânico}}/S_{\text{total}}$  no tecido é considerada melhor indicativo do estado nutricional da planta, isto é, uma relação muito baixa ( $<0,25$ ) significa deficiência de S (Marschner, 1995).

#### Sintomas (visíveis)

- Clorose; enrolamento das margens das folhas;
- folhas pequenas; necrose e desfolhamento;
- internódios curtos; redução de florescimento;
- plantas raquíticas.

#### Outros distúrbios

- Desordens na estrutura dos cloroplastos;
- diminuição da atividade fotossintética;
- aumento de relação N solúvel/N protéico.

Plantas sem deficiência de enxofre poderá apresentar maior tolerância a toxidez de metais (Co, Cd) em áreas contaminadas, pois as plantas desenvolvem mecanismos de produção de proteínas pequenas ( $<10$  kDa) ricas em S (cisteína) chamadas de metalotioninas, cuja função é reduzir as formas livres desses elementos no tecido vegetal (Marschner, 1995).

Friedrich & Schrader (1978) observaram que a deficiência de enxofre levou à redução da atividade da enzima nitrato redutase, ao acúmulo de nitrato e à redução nas concentrações de proteína solúvel e clorofila.

#### Excesso de enxofre

As plantas, no geral, são relativamente tolerantes a altos níveis de  $S-SO_4^{2-}$  na solução do solo. Em solos com alta concentração de sulfato (50mM), podem ocorrer problemas, mas que se confundem com efeitos de salinidade, como pequeno desenvolvimento da planta e intensa coloração verde-escura das folhas. Além disso, pode ocorrer senescência prematura de folhas.

---

Entretanto, em ar poluído (0,5-0,7 mg de S-SO<sub>2</sub>/M<sup>3</sup> de ar) pode haver efeitos tóxicos, pela produção nas cavidades estomatais de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, que se dissocia em H<sup>+</sup>, HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>, que tem capacidade de desacoplar as reações de fotofosforilação, causando efeito tóxico (necrose foliar). Khan et al. (2006) verificaram, em milho, que o teor foliar de S igual 8 g kg<sup>-1</sup>, foi considerado excessivo.

<b>DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA</b>		<b>NUTRIENTE: ENXOFRE</b>
<b>FOTOS</b>		<b>DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS</b>
 <p>(a) (b)</p>		<p>Folhas jovens uniformemente cloróticas (Foto 1a- folha a esquerda deficiente e a direita normal); podem desenvolver coloração roxo-clara; folhas menores e mais estreitas que as normais; colmos muito finos (Foto 1b).</p>
<p><b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b></p>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>As folhas novas apresentam coloração amarelo-pálida ou verde suave (Foto 2a), causando redução do tamanho da planta (Foto 2b – planta a esquerda normal e a direita deficiente). Ao contrário da deficiência de N, os sintomas ocorrem nas folhas novas, indicando que os tecidos mais velhos não podem suprir o S para os tecidos novos, os quais são dependentes do nutriente absorvido pelas raízes</p>
<p><b>Foto 2. MILHO</b></p>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>Tem-se uma clorose nas folhas mais novas do ponteiro (Foto 3a). Diferencia-se da carência de N por ocorrer nas partes jovens das plantas, onde as pequenas folhas são verde-claras, brilhantes, com aspecto semelhante ao das folhas novas dos citros ("verde-limão") (Foto 3b). Há queda excessiva de formações jovens e prematura de folhas. O ciclo da planta é diminuído.</p>
<p><b>Foto 3. ALGODÃO</b></p>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>Os sintomas foliares são parecidos com os provocados pela falta de nitrogênio mas aparecem nas folhas mais novas (Foto 4a), mantendo coloração amarelada uniforme no limbo foliar (Foto 4b). Os internódios encurtam.</p>
<p><b>Foto 4. CAFÉ</b></p>		
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>		

**Figura 51.** Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de S em diversas culturas.

## Capítulo 6 Fósforo

### 6.1 Introdução

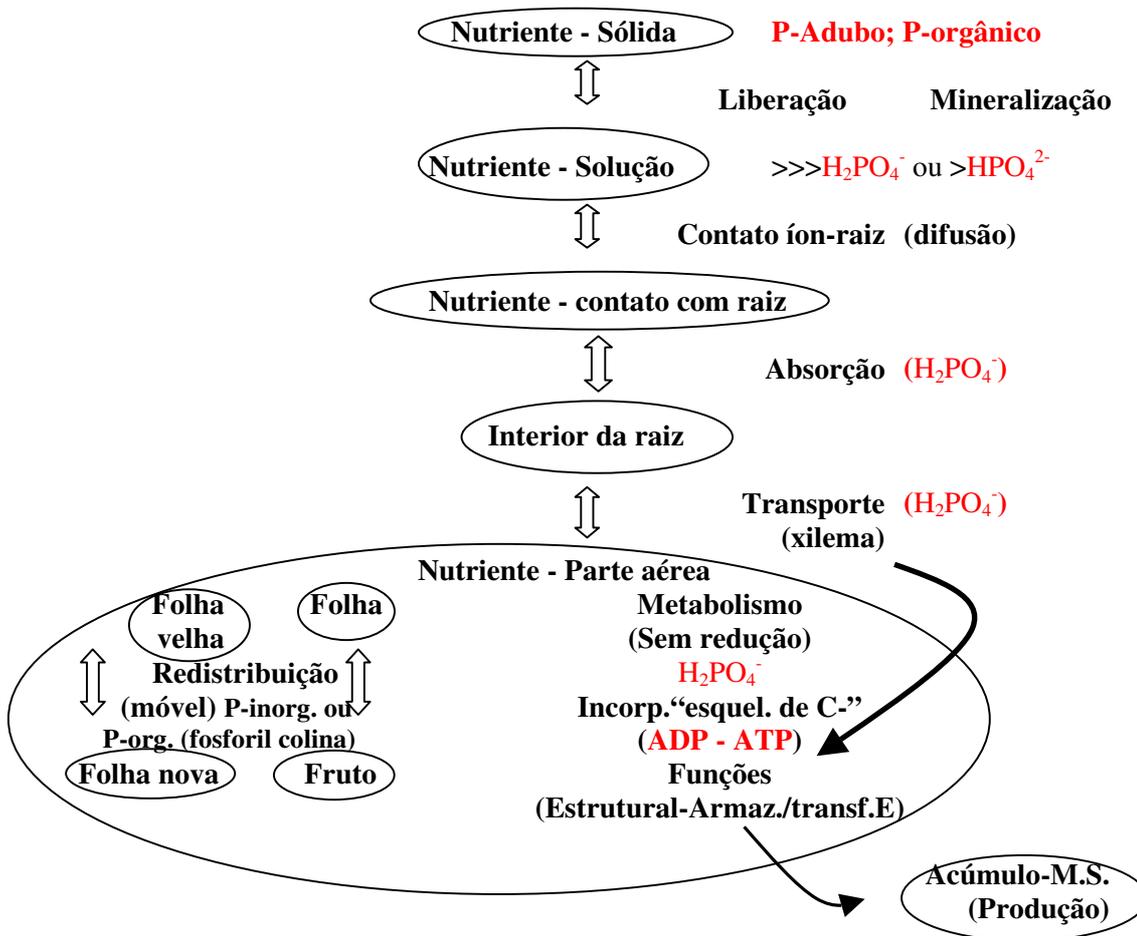
Os solos tropicais apresentam, normalmente, baixa concentração de fósforo disponível e alto potencial de “fixação” do P aplicado via fertilizante. Este contexto coloca o fósforo, junto com nitrogênio, como um dos nutrientes que mais limita a produção das culturas no Brasil.

O aumento do fósforo no solo é importante, seja pela adubação mineral, fornecendo P prontamente disponível às plantas seja pela orgânica, que só se tornará disponível quando os microorganismos do solo “quebrarem” a matéria orgânica em formas simples, liberando os íons fosfato inorgânico (fósforo disponível). No solo, 20 a 80% do P total encontra-se na forma orgânica, principalmente como fitato (Raghothama, 1999).

Assim, após a aplicação do fósforo ao solo, ocorre uma série de transformações, podendo permanecer em compartimentos da fase sólida (lábil e não-lábil) e/ou da fase líquida (solução). Na fase sólida, o fósforo lábil é aquele que está fracamente retido no solo, tendo a função de manter um equilíbrio rápido com a solução do solo; isso não ocorre com fósforo não lábil, visto que o elemento está fortemente retido no solo. Na fase líquida encontra-se o fósforo disponível, estando na forma iônica ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ;  $\text{HPO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ). Nesta fase, a forma iônica que predomina é a  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , devido à reação ácida dos solos brasileiros (~pH=5,5). Em pH 7,1, existe igualdade de concentrações entre as espécies iônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ . À medida que o valor pH diminui (aumento  $[\text{H}^+]$ ) aumenta proporcionalmente, a presença da espécie  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ .

Como as plantas absorvem o fósforo do solo, especificamente da solução (fase líquida), estas formas são as que interessam na nutrição de plantas. Os estudos de fertilidade de solo que tratam dos fatores que propiciam o aumento do fósforo disponível (pH, tipo e quantidade de minerais de argila, níveis de P no solo, aeração, umidade, temperatura e disponibilidade de outros nutrientes) contribuem para melhor compreensão dos aspectos ligados à nutrição das plantas.

No estudo do fósforo no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo-raiz até a parte área (folhas/frutos), ou seja, do solo até sua incorporação em um composto orgânico ou desempenhando o papel do ativador enzimático, contribuindo para funções vitais que possibilitem a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 52).



**Figura 52.** Dinâmica do fósforo no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

## 6.2 Absorção, transporte e redistribuição do fósforo

### a) Absorção do fósforo

O fósforo é absorvido da solução do solo na forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  ou  $\text{HPO}_4^{2-}$ ; entretanto, como no solo predomina a forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , esta é a forma que predomina durante o processo da absorção. Antes que ocorra a absorção propriamente dita do fósforo, é preciso ocorrer o contato deste nutriente com a raiz. Especificamente para o fósforo (conforme salientado anteriormente – capítulo Absorção iônica radicular), este movimento do nutriente no solo é governado pelo fenômeno da difusão (movimento de íons a favor de um gradiente de concentração), responsável por mais de 94% do contato P-raiz (Tabela 10). Este movimento do P no solo, caracterizado por percorrer pequena distância, indicando a necessidade da aplicação localizada (próxima do sistema radicular da planta), favorece o processo de absorção. Além disso, o processo de difusão depende da água, conforme foi constatado na cultura do milho, por Mackay & Barber (1985) em que a

umidade adequada do solo mostrou-se importante para garantir difusão suficiente do P até a raiz e, conseqüentemente, maior absorção e produção de matéria seca (Tabela 28).

**Tabela 28.** Efeito da umidade do solo na absorção de P e na produção de matéria seca do milho (Mackay & Barber, 1985a)

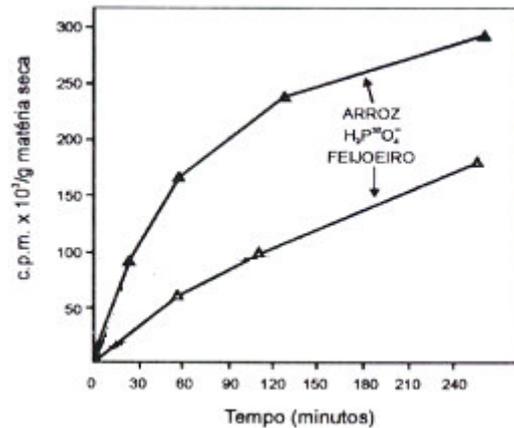
	Umidade do solo		
	Deficiente (-170 kPa)	Adequada (-33 kPa)	Excessivo (-7,5 kPa)
P absorvido (umol/vaso)	229	381	352
Parte aérea (g/vaso)	2,6	4,0	3,6
Raízes (g/vaso)	0,8	1,0	0,9

Solo (P disponível=74 ppm)

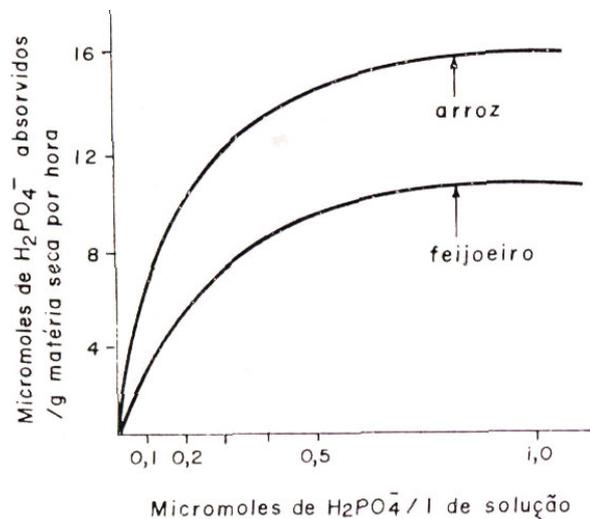
O processo de absorção do fósforo ocorre, basicamente, em duas fases: uma passiva rápida e outra ativa mais lenta. No tocante a esta questão, Malavolta et al. (1997) verificaram em plantas de feijão, o processo passivo e ativo na absorção de fósforo marcado (Figura 53). No caso do fósforo ( $H_2P^{32}O_4$ ), observaram-se, nos primeiros 60 minutos, uma absorção rápida, indicando o processo passivo e, em seguida, uma absorção lenta, até completar os 240 minutos, caracterizando o processo ativo (Figura 53). O processo ativo é lento devido à necessidade de ir contra um gradiente de concentração muito elevado presente nas células das raízes e na seiva do xilema que é cerca de 100 a 1000 vezes maior que da solução do solo. Além disso, o pH ácido (4,0), no apoplasto celular, aumenta a absorção de P em três vezes comparado ao pH 6,0 (Setenac & Grignon, 1985). Cabe ressaltar que a absorção de fosfato é considerada como sendo feita por intermédio de  $H^+$  cotransportador (Ulrich-Eberius et al., 1981).

O modelo mecanístico de absorção de fósforo, obtido em laboratório, envolve a planta, como superfície/geometria da raiz e cinética de absorção, e também os parâmetros de fornecimento pelo solo. Nestes modelos, os parâmetros mais importantes que contribuem para a maior absorção de P pelas plantas são: 1- velocidade de alongação da raiz; 2- concentração inicial do P no solo; 3-raio da raiz.

A literatura aponta vários fatores que podem afetar o processo de absorção, como os fatores externos e internos discutidos anteriormente (*capítulo absorção iônica radicular*). No caso específico do fósforo, os fatores externos são importantes, pois aumentam a concentração na solução do solo ou da solução nutritiva e daí tem-se uma relação direta com a absorção pela planta, como no caso do feijoeiro (Figura 54).



**Figura 53.** Absorção de fósforo radiativo “marcado” em função do tempo, caracterizando um processo de absorção passivo seguido do ativo (Malavolta et al.,1997).

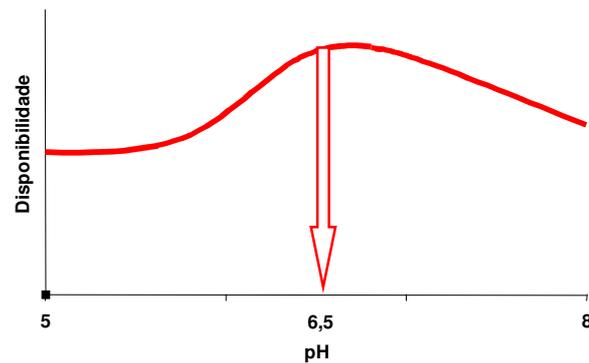


**Figura 54.** Relação entre a concentração de P na solução e a absorção de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> (Malavolta, 1980).

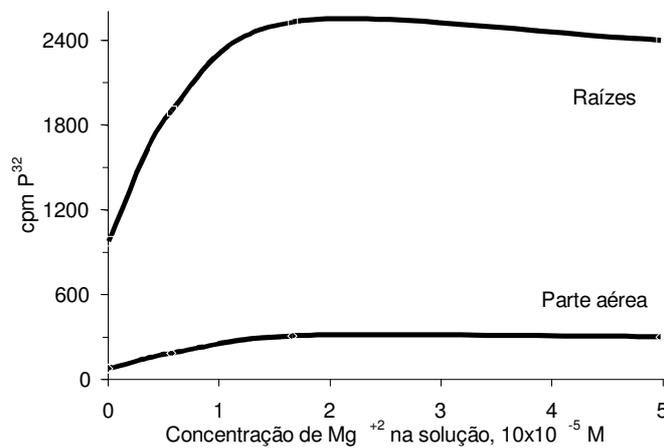
Os fatores externos que influenciam a absorção de P pelas plantas estão relacionados ao pH do solo, efeitos de outros elementos, temperatura e oxigênio.

#### a1 Efeito do pH e de outros nutrientes

O valor pH do solo, como um fator isolado, é o que mais afeta a disponibilidade de fósforo no solo, sendo o pH próximo de 6,5 o que promove a maior disponibilidade na solução do solo (Figura 55) e, conseqüentemente, maior absorção pela planta. A presença de outros íons na solução como o magnésio, apresenta efeito sinérgico na absorção de fósforo, tendo em vista que o Mg funciona como um carregador do P. Assim, em um experimento com cevada, observou-se que a presença de Mg junto com P “marcado”, incrementaram a absorção do P da raiz e o transporte para a parte aérea (Figura 56).



**Figura 55.** Efeito do valor pH na disponibilidade de P.



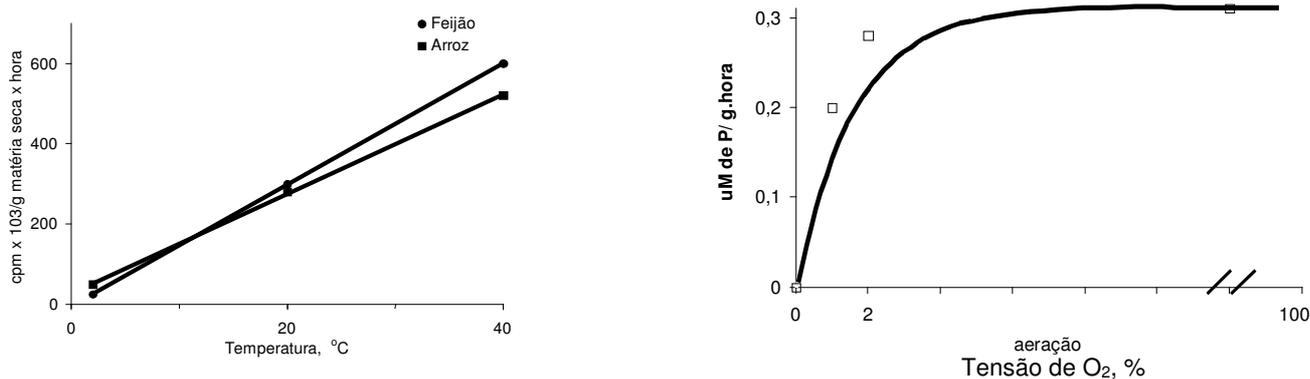
**Figura 56.** Efeito do magnésio presente na solução sobre a absorção do P “marcado”, (c.p.m) em cevada (Adaptado de Malavolta, 1980).

## a2 Efeito da temperatura e do oxigênio

A temperatura afeta linearmente a absorção do P tanto no arroz como no feijoeiro (Figura 57a). Isto ocorre porque a temperatura tem efeito direto na intensidade respiratória das plantas. A aeração, por meio da oxigenação, promove incremento quadrático na absorção do P “marcado”, em raízes de cevada (Figura 57b).

Isto ocorre, porque o oxigênio é necessário para a respiração das raízes, para fornecer energia (ATP) para a absorção (ativa).

Quanto aos fatores internos, relativos à planta, estes podem ser resumidos em: os de ordem genética, de níveis de P e carboidratos na raiz e também da associação com microorganismos (Tabela 29).



**Figura 57.** Efeito da temperatura sobre a absorção de P “marcado” ( $\text{cmp} \cdot 10^3/\text{g}$  de matéria seca) pelas raízes de arroz e de feijoeiro (a) e da aeração na absorção do P “marcado”, por raízes de cevada (Malavolta, 1980).

**Tabela 29.** Alguns fatores internos que afetam a absorção de fósforo pelas plantas (Malavolta et al., 1997)

Fator	Especialização
Genética	Variação nos parâmetros da cinética de absorção ou morfologia das raízes A resposta da soja ao P é controlado por um par de genes Múltiplos genes codificam carregadores do fosfato
Nível de P no floema	Sinal de retro-alimentação para regular a absorção de P
Nível de P e de carboidrato na raiz	A velocidade, em certo limite, será maior quanto maior o nível de carboidratos na raiz.
Micorrizas	Aumenta a absorção de P pela hifas ramificadas

A relação dos efeitos benéficos da micorriza no aumento da absorção de P pelas plantas é uma área muito estudada e promissora. Este efeito benéfico na nutrição das plantas é maximizado apenas em espécies passível de permitir ótima taxa de colonização das raízes. Além, disso o desequilíbrio na disponibilidade de de P no solo (teor alto) afeta negativamente a simbiose e o crescimento da planta (Nogueira & Cardoso, 2006).

É oportuno destacar, que as raízes novas apresentam alta capacidade de absorção de fósforo, enquanto as raízes mais velhas apresentam baixa capacidade (Tabela 30).

**Tabela 30.** Taxa de absorção de fósforo pelo milho, em função da idade da planta (dias)

Idade da planta (dias)	P ( $\mu\text{mol}/\text{m}$ raiz/dia)
20	11,3
30	0,90
40	0,86
50	0,66
60	0,37
70	0,17
80	0,08

A habilidade das raízes das plantas em absorver o P, sob condições de baixa disponibilidade, é um processo complexo, uma vez que depende de inúmeras respostas, conforme são mostradas na Tabela 31, resumidamente.

Normalmente, quando a disponibilidade de Pi no solo é limitada, um mecanismo de absorção de alta afinidade é ativado (Schachtman et al., 1998). Portanto, nível muito baixo de P no meio externo, pode aumentar a velocidade de absorção em cerca de três vezes, dependendo da espécie de planta. Assim, há dois mecanismos que podem participar da absorção de Pi, o de alta e baixa afinidade. O primeiro, tem um baixo  $K_m$  (3 a 7  $\mu\text{M}$  de Pi), com papel preponderante em solos de baixa disponibilidade de P e o segundo um alto  $K_m$  (50 a 300  $\mu\text{M}$  de Pi). Apenas o mecanismo de alta afinidade poderia ser afetado pelo meio, o que não ocorre com o mecanismo de baixa afinidade que é constitutivo (Raghothama, 1999).

**Tabela 31.** Múltiplas respostas das plantas à deficiência de fosfato (Raghothama, 1999).

---

**Morfológicas:** Aumento da razão raiz:parte aérea; mudança na morfologia e arquitetura da raiz; aumento na proliferação de pêlos radiculares; alongação das pêlos radiculares; acúmulo de pigmentos de antocianina; formação de raiz proteoides; aumento da colonização micorrizica.

**Fisiológicas:** Aumento da absorção de fosfato; reduz efluxo de Pi; aumenta a eficiência de uso de Pi; mobilização de Pi do vacúolo para o citoplasma; aumento da translocação do fósforo na planta; re-translocação do Pi das folhas velhas; retenção de mais Pi na raiz; secreção de ácidos orgânicos, prótons e quelantes; secreção de fosfatases e RNAses; alteração da respiração, metabolismo carbono, fotossíntese, fixação de nitrogênio e rotas de enzimas aromáticas.

---

### b) Transporte do fósforo

Logo após o processo de absorção do fósforo, desencadeia-se o processo de transporte, ocorrendo de forma semelhante à absorvida, ou seja, predominantemente como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ; entretanto, pode ser encontrado no xilema em baixa concentração na forma orgânica (fosforil colina ou ésteres de carboidratos).

### c) Redistribuição do fósforo

O processo de redistribuição do fósforo ocorre exclusivamente na forma orgânica, mas, pode ser encontrado no floema também na forma inorgânica. Este processo de redistribuição ocorre no floema, e o P-orgânico apresenta alta mobilidade. Sendo prontamente móvel na planta no sentido ascendente ou

descendente, as folhas novas são supridas não só pelo fosfato absorvido pelas raízes, mas também pelo fosfato originado das folhas mais velhas. Assim, as plantas deficientes em P demonstram primeiramente os sintomas de deficiência na folha velha. Estima-se que cerca de 60% do P da folha velha é passível de ser remobilizado via floema para as folhas novas (Malavolta et al., 1997). Os detalhes da sintomatologia de deficiência nutricional de P serão abordados no final (*Sintomatologia de deficiências*).

Cabe ressaltar, ainda, que alguns experimentos têm mostrado que pode existir alguma compartimentalização do P nas plantas (a exemplo do milho), quando este nutriente é fornecido em uma parte do sistema radicular, sendo atribuído ao tipo de vascularização entre as folhas e raízes (Stryker et al., 1974). Neste sentido, experimento com a cultura do milho indica que aplicação de fósforo feita em ambos os lados da planta (sulco duplo), foi superior à aplicação em um lado apenas (sulco simples) e também em todo o volume de solo (a lanço) em termos de incremento da produção de grãos (Tabela 32).

**Tabela 32.** Teor foliar de P, incremento de produção de milho e fator de utilização do fósforo, em função dos modos de aplicação de P no solo (Prado et al., 2001).

Dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Modo de aplicação								
	Lanço			Sulco simples			Sulco duplo		
	Teor de P <sup>(1)</sup>	Aumento da produção <sup>(2)</sup>	Fator P <sup>(3)</sup>	Teor de P	Aumento da produção	Fator P	Teor de P	Aumento da produção	Fator P
kg ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	
45,0	2,1	0,13	0,346	2,1	0,45	0,100	2,1	0,21	0,210
67,5	2,1	0,20	0,337	2,2	1,32	0,051	2,3	1,54	0,044
90,0	2,3	0,24	0,375	2,5	2,06	0,044	2,5	2,82	0,032
112,5	2,3	0,28	0,402	2,6	2,76	0,041	2,7	3,63	0,031
135,0	2,4	0,57	0,237	2,7	3,04	0,044	2,9	4,40	0,031
Média(4)	2,2B			2,4AB			2,4A		

<sup>(1)</sup> na testemunha, sem P, teor foliar= 2,1 g kg<sup>-1</sup>. <sup>(2)</sup> Obtido em relação à média de produção de grãos (4,58 t ha<sup>-1</sup>) na dose zero (ausência de aplicação de P) considerando os três modos de aplicação. <sup>(3)</sup> Fator P: fator de utilização do P (kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/aumento de produção em kg ha<sup>-1</sup>). <sup>(4)</sup> Letras iguais não diferenciam entre si pelo teste de Tukey (P <0,05).

### 6.3 Participação no metabolismo vegetal

Diferentemente do N e S que sofrem reduções na planta, o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , na forma oxidada, permanece assim, da mesma forma que foi absorvida e transportada. Na planta o P, ocorre, em formas orgânicas e inorgânicas (acumulado no vacúolo) que são liberadas para o citosol a medida que a planta necessita, evitando prejudicar algum processo fisiológico importante (fotossíntese), na ausência de P no meio externo.

Na prática, o fósforo absorvido pelas células é rapidamente metabolizado; por volta de 10 minutos, a maior parte do fosfato (cerca de 80%) já está incorporado a compostos orgânicos (Jackson & Hagen, 1960).

Assim, o P total nas plantas com estado nutricional adequado, ocorre predominantemente na forma inorgânica (ortofosfato), solúvel em água, presente no vacúolo. Por outro lado, em plantas deficientes em P, forma inorgânica predomina, sendo encontrado no citoplasma e nos cloroplastos das células das folhas, isto é, no 'local metabólico' (Foyer e Spencer, 1986). Na folhas, o conteúdo total de P pode variar cerca de 20 vezes, sem afetar a fotossíntese, sendo que a concentração de P inorgânico no citoplasma é regulada, em uma faixa estreita, pela homeostase efetiva de fósforo, na qual o P inorgânico dos vacúolos atua como um tampão (Mimura et al., 1990). E outra parte importante do P está na forma orgânica, em quatro grandes grupos:

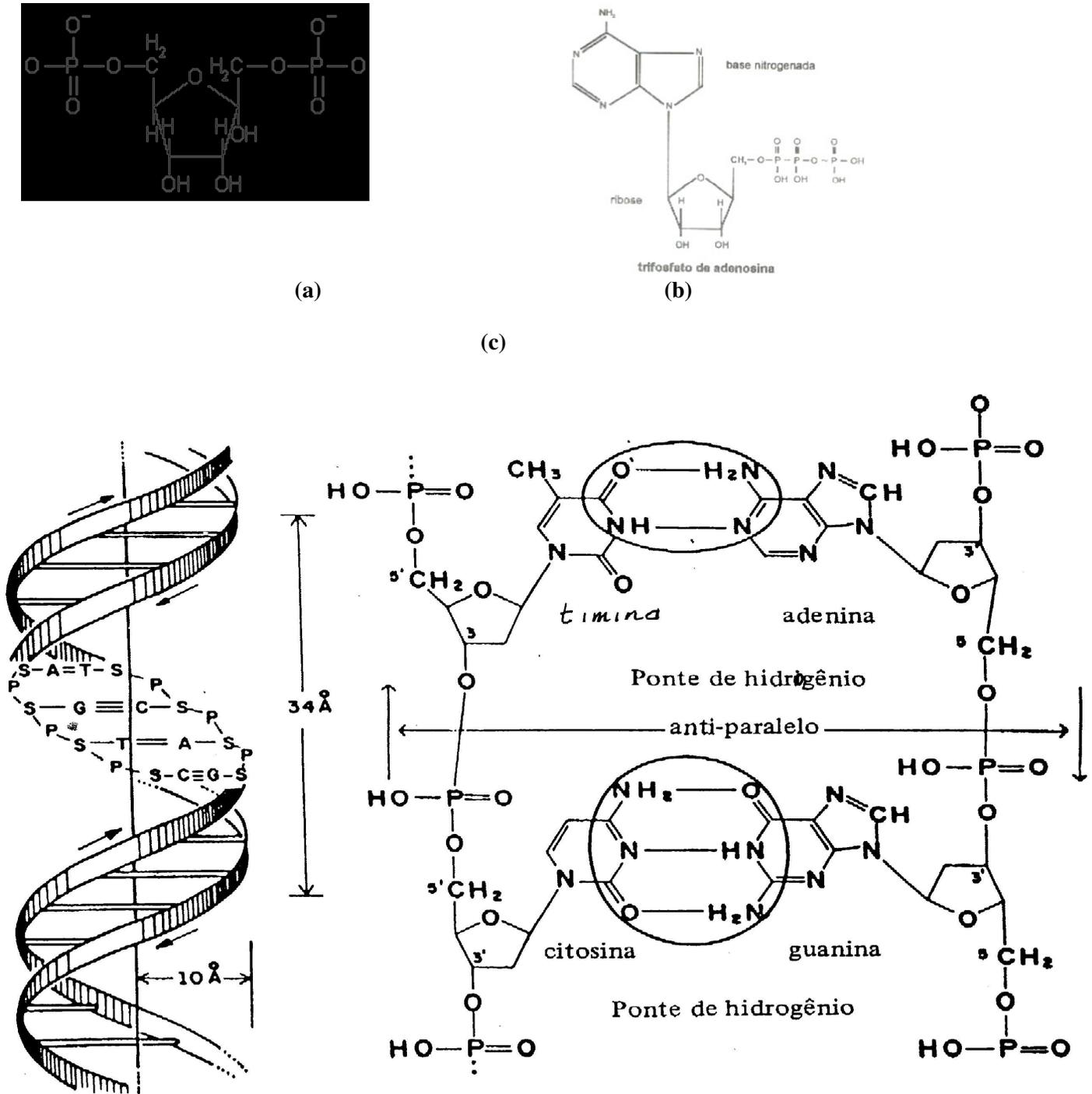
a) Ésteres fosfóricos, existem mais de 50, como trioses, frutose-1-6-bifosfato (Figura 58) (compostos intermediários do desdobramento dos açúcares). As ligações energéticas destes compostos representam “a máquina que move todo o metabolismo vegetal”.

b) fosfolipídios (componente da membrana, conferindo a natureza lipídica);

c) nucleotídeos:

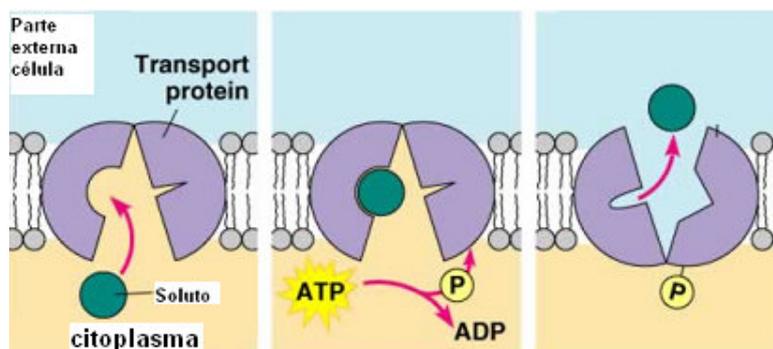
Base Nitrogenada + Pentose +1-3 radicais de ácidos fosfóricos, podendo estar livres: na forma de **ATP - ADP** ou combinadas em ácidos nucléicos: **RNA e DNA**. A função principal do P no DNA é a de formar uma ponte estrutural entre os nucleosídeos (= pentose + base) que são as letras do código genético.

Salienta-se que o caminho mais importante para sua entrada em combinações orgânicas é por meio da esterificação de um grupo OH da pentose ligada à adenina (conjunto de base+ribose = adenosina) resultando em monofosfato de adenosina, difosfato de adenosina até trifosfato de adenosina (ATP) (Figura 58b). d) Ácido fítico: éster hexafosfórico ou inositol, que é a substância de reserva de P na planta.



**Figura 58.** Estrutura de um éster fosfórico (frutose 1-6 difosfato) (a) e um trifosfato de adenosina (ATP) (b) e DNA (c).

Ressalta-se, ainda, que a energia produzida na fotossíntese e também na respiração, é armazenada principalmente na forma de ATP. A ligação fosfatada com alta energia é um meio para armazenar e usar grandes quantidades de energia de 12.000 a 16.000 calorias. Esta energia a planta usa nos diversos processos vitais, desde o transporte de solutos pelas membranas das células (Figura 59), trabalho mecânico de penetração da raiz no solo, na absorção ativa de nutrientes até na síntese de amido (presente nos grãos).



**Figura 59.** Papel do ATP no transporte de solutos pelas membranas das células.

Neste sentido, é difícil imaginar em qual fenômeno biológico o fósforo, nos seus diferentes compostos, não participe direta ou indiretamente.

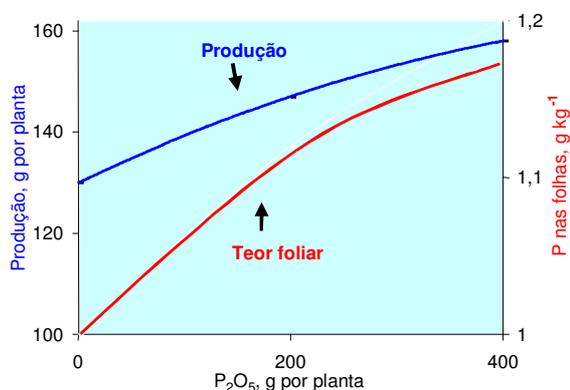
A acumulação de amido e açúcares nas folhas das plantas deficientes em fósforo pode, também, ser indiretamente, o resultado de uma exportação menor, devido às limitações no ATP, para o transporte de próton-açúcares, no carregamento, através do floema, e uma menor demanda nos locais de acúmulo (Rao *et al.*, 1990).

Assim, as funções que desempenham estes compostos estão ligadas ao aspecto estrutural e no processo de transferência/armazenamento de energia e em outros processos (Tabela 33).

**Tabela 33.** Funções do fósforo nas plantas (Malavolta et al., 1997)

Estrutural	Processos
Ésteres de carboidratos	Transferência/armazenamento de energia
Fosfolipídios	Absorção iônica
Coenzimas	Fotossíntese
Ácidos nucléicos	Sínteses (protéica)
Nucleotídeos	Multiplicação e divisão das células
	Herança
	Fixação biológica do N

Frente à importância do P na nutrição das plantas, é frequente os efeitos deste nutriente na produção das culturas em solos tropicais. Assim, a aplicação do P no solo deverá aumentar seu teor nas folhas e com reflexo na produção, a exemplo do citros (Figura 60).



**Figura 60.** Efeito da aplicação do P no teor foliar e na produção do citros (Adaptado, Malavolta et al., 1997).

#### 6.4. Exigências nutricionais das culturas

Conforme dito anteriormente, o estudo da exigência nutricional das culturas deve refletir a extração total do nutriente do solo, respeitando a extração em cada fase de desenvolvimento da cultura, para satisfazer às necessidades nutricionais das plantas, visando à máxima produção econômica.

Salienta-se que o teor total de P na planta para crescimento/ desenvolvimento ótimo é de 0,3-0,5% (3-5 g kg<sup>-1</sup>) do peso seco; entretanto, estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores, que serão objetos de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente e a marcha de absorção deste nutriente ao longo do cultivo.

##### a) Extração e exportação de nutrientes

A extração total de fósforo é função do teor de P na planta e da quantidade de matéria seca acumulada. Portanto, depende da produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade no solo, do manejo da cultura, entre outros.

Quanto à espécie vegetal, nota-se variação da quantidade exigida em função das culturas (Tabela 34).

Pelos resultados, observa-se que a extração total de fósforo variou de 8,2 (algodoeiro em baixa produção) até 56 kg ha<sup>-1</sup> (milho) (se considerarmos a produção obtida em um hectare). Entretanto, em

valores absolutos de extração total de fósforo, observa-se alta exigência das leguminosas soja/feijão e baixa das gramíneas cana-de-açúcar/arroz, com valores de 5,0 até 13,3 kg para cada tonelada de produto (colmos/grãos) produzido, respectivamente.

**Tabela 34.** Exigências de fósforo das principais culturas (Malavolta et al., 1997)

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida t ha <sup>-1</sup>	P acumulado		P requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup> kg t <sup>-1</sup>
			Parte da planta	Total <sup>(3)</sup> kg ha <sup>-1</sup>	
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	4 (3,1) <sup>(2)</sup>		
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	4	8,2	6,3
	Raiz	0,5	0,2		
<b>Soja<sup>(1)</sup></b>	Grãos	3	26 (8,7)	40	13,3
	Caule/ramo/folha	6	14		
<b>Feijão</b>	Vagem	1	4 (4,0)		
	Caule	0,4	0,6	9,7	9,7
	Folhas	1,2	5		
	Raiz	0,1	0,1		
<b>Milho<sup>(1)</sup></b>	Grãos	6,4	24 (3,8)	56	8,8
	Restos culturais	-	32		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	8 (2,7)		
	Colmos	2 (m.s.)	3		
	Folhas	2 (m.s.)	1	17	5,7
	Casca	1	2		
	Raiz	1(m.s.)	3		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	11 (3,7)	20	6,7
	Palha	3,7	9		
<b>semi-perene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	10 (0,1)	20	5
	Folhas	25	10		
<b>Cafeeiro<sup>(1)</sup></b>	Grãos (coco)	2	3 (1,5)		
	Tronco, ramos e folhas	-	16	19	9,5

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (kg t<sup>-1</sup>): N acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de P da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: P acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

Quanto à exportação de P por tonelada de grãos produzidos, observa-se que a soja é a que mais exporta (8,7 kg/t), entretanto, para maioria das culturas, o fósforo concentra-se nos grãos, isto ocorre segundo Stauffer & Sulewski (2004), porque o P está ligado aos processos metabólicos da planta, ele sendo móvel, ficaria concentrado nas áreas mais ativas de crescimento, de forma que a maior do P absorvida é transferida para os grãos. Isto porque o P nos grãos está ligado aos compostos orgânicos de reserva como os fitatos. Os fitatos estão, presumivelmente, envolvidos na regulação da síntese de amido, durante o enchimento dos grãos. Assim, parte do P está associada com a fração amido e é incorporada nos grãos de amido.

### b) Marcha de absorção

O estudo da marcha de absorção (nutriente acumulado em função do tempo de cultivo) é importante porque permite determinar as épocas em que os elementos são mais exigidos e corrigir as deficiências que, porventura venham a ocorrer durante o desenvolvimento da planta.

Na cultura do algodoeiro, Mendes (1965) obteve a marcha de absorção acumulativa, em todo o ciclo de desenvolvimento das plantas, que durou 150 dias. Observa-se, absorção inicial lenta, sendo que na fase de florescimento, atingiu 40% (fase inicial) até 65% (fase final). Na fase inicial de deiscência, a absorção atingiu os 80%, completando com os 100% na fase final, aos 130 dias (Tabela 35).

**Tabela 35.** Marcha de absorção (cumulativa) de fósforo do algodoeiro em solução nutritiva (Mendes, 1965).

Dias	Estádio de desenvolvimento	P absorvido, % do total
10		1
20		5
30	Abotoamento	13
40		24
50		34
60		40
70	Florescimento	48
80		56
90		65
100		70
110	Frutificação	78
120		85
130		90
140		95
150		100
	Deiscência	

Nota-se, ainda, que a absorção de fósforo pelo algodoeiro ocorre de forma crescente e constante. Assim, é importante a manutenção do fósforo durante toda a fase de desenvolvimento da cultura, cuja aplicação do P, que é normalmente feita na adubação de plantio.

Fageria (1998) conduziu um experimento em casa de vegetação, com o objetivo de se avaliar a eficiência do uso de P pelos 15 genótipos de feijão em níveis baixo, médio e alto de P, em um Latossolo Vermelho-Escuro. Diferenças significativas foram obtidas entre genótipos com o uso de fósforo (Tabela 36). Os genótipos Rio Doce, São José, IPA9 e Roxo9 foram classificados como eficientes e responsivos.

Salienta-se, que as diferenças inter e intraespecíficas na capacidade de utilizar o fósforo (P) do solo são explicadas, em parte, por variações na morfologia e fisiologia das raízes, as quais caracterizam as plantas quanto à aquisição do nutriente. Föhse et al. (1988), complementam, que a eficiência das plantas em relação ao P estava relacionada com a eficiência de absorção deste nutriente, a qual foi determinada pela razão entre o comprimento do sistema radicular e biomassa da parte aérea, bem como pela taxa de absorção por unidade de comprimento de raiz (influxo).

Deste modo, Machado & Furlani (2004), estudando cultivares de milho, em solução nutritiva, verificaram que os menores valores de Km e Cmin foram bons indicadores da capacidade de absorção de P das plantas, tendo se relacionado com as maiores produções de matéria seca e os maiores índices de eficiência de utilização de P.

**Tabela 36.** Parâmetros de crescimento, teor e uso de fósforo por 15 genótipos de feijão<sup>1</sup> (Fageria, 1998)

Genótipos	M.S. parte aérea	M.S.raízes	Teor de P na parte aérea	Teor de P na raiz	Eficiência do uso de P (mg M.S./mg P acumulado) <sup>2</sup>
	g.vaso <sup>-1</sup>	g.vaso <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	
1.Aporé	2,93ab	0,89abc	3,3ab	1,9abc	615b
2.Goitacazes	2,58abc	0,98ab	3,1b	1,8bc	709b
3.Carioca-MG	2,64abc	0,91abc	3,3ab	1,8bc	739b
4.Carioca-IAC	3,03a	1,16a	3,5a	1,7c	687b
5.Rio Doce	2,61abc	0,96ab	3,4ab	1,8bc	906ab
6.Emgopa 201-Ouro	2,37bc	0,82bc	3,3ab	2,2a	522b
7.IPA 6	2,67abc	1,07ab	3,3ab	1,8bc	680b
8.São José	2,66abc	0,94ab	3,1b	1,7c	937ab
9.Ipa 9	2,50abc	1,01ab	3,3ab	1,7c	1306a
10.Ônix	2,58abc	0,77bc	3,3ab	1,8bc	968ab
11.Xodó	2,13c	0,62c	3,1b	1,8bc	760b
12.Serrano	2,51abc	1,00ab	3,1b	1,7c	632b
13.Pot 51	2,89ab	0,87abc	3,3ab	1,9abc	1023ab
14.Safira	2,67abc	0,99ab	3,2b	1,8bc	500b
15.Roxo 9	2,71abc	1,00ab	3,2b	2,1ab	528b

<sup>1</sup> Os valores são médias de três níveis de fósforo. Valores seguidos da mesma letra na mesma coluna não diferem significativamente a 5% de probabilidade, pelo teste de Duncan.

## 6.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

### a) Deficiência

O sintoma mais característico de deficiência de fósforo (denominador comum da deficiência) é o aparecimento de coloração verde mais escura nas folhas mais velhas, visto que o número de folhas e a expansão da área foliar, diminui muito em detrimento da formação de clorofila. Embora o número de clorofila aumente, a taxa fotossintética unitária é baixa. Além disso, em algumas espécies tem-se coloração avermelhada ou arroxeadas; em outras, para clorose e necrose dos tecidos (Figura 61). A coloração escura é devido ao acúmulo de pigmentos vermelho, azul ou púrpura que pertencem ao grupo conhecido como antocianinas. Esses pigmentos são glicídios formados pela reação entre açúcar e um grupo de compostos complexos cíclicos, as antocianidinas.

Na deficiência de P, as plantas apresentam acúmulo de açúcares (energia química em potencial), ao mesmo tempo, sofrem falta de energia, por meio do ATP. Esta falta de energia, compromete os processos de biossíntese da planta. Assim, ocorre decréscimo acentuado na síntese de RNA, amido e lipídeos, ocorrendo diminuição da ativação de aminoácidos necessários à ligação de peptídeo das proteínas e, portanto, deficiência protéica acentuada e acúmulo de compostos nitrogenados solúveis. Esta deficiência protéica é responsável pela depressão no desenvolvimento vegetativo da planta. Além disso, o P atua como regulador da fotossíntese e metabolismo de carboidratos, limitando o desenvolvimento das plantas. E ainda, a deficiência de P pode provocar acúmulo de amidos nos cloroplastos, devido à falta de energia suficiente para a translocação de assimilados (carregamento de sacarose no floema é um processo exigente em energia metabólica – ATP).

Os sintomas de deficiência de fósforo, de modo geral, podem ser assim resumidos:

- a) Pequeno desenvolvimento;
- b) Coloração verde mais escura de folhas velhas; coloração roxa em algumas espécies (estresse hídrico e danos nas raízes também pode provocar a coloração roxa) ;
- c) Ângulo estreito de inserção de folhas;
- d) Baixo florescimento; número reduzido de frutos e sementes; atraso na maturidade.

A literatura também indica outros efeitos da deficiência de P tais como:

Diminuição do acúmulo de massa seca do caule ou da parte reprodutivos, em detrimento aos outros órgãos das plantas. Em *Stylosanthes humata*, sob deficiência de fósforo, o crescimento do caule diminui rapidamente, mas as raízes continuam a crescer, não somente, porque retém mais fósforo, mas também devido à uma translocação líquida adicional de fósforo do caule para as raízes (Smith et al., 1990). Assim, as plantas sob deficiência tem um mecanismo de adaptação, tendo maior translocação de carboidratos para a raiz minimizando prejuízos ao sistema radicular.

Entretanto, os problemas fitossanitários podem ocorrer em plantas deficientes em P, apresentando desenvolvimento do sistema radicular limitado, comprometendo o processo de absorção de todos os nutrientes. Nesta situação, o sistema radicular pode ficar mais suscetível ao ataque de patógenos “doenças de raiz”, com menor atividade microbiológica na rizosfera. Soma-se a isto, que plantas deficientes em P, têm atraso no amadurecimento dos grãos (maturação fisiológica atrasada), deixando a planta por mais tempo no campo, aumentando as chances de ataques de pragas, principalmente.

#### **b) Excessos de fósforo**

É uma desordem rara na literatura, entretanto, existem indicações de pintas vermelho-escuras nas folhas velhas. Por outro lado, diversos autores citam efeitos depressivos do fósforo sobre a utilização dos micronutrientes catiônicos pelas plantas, especialmente o Zn, e outros em menor intensidade (Cu, Fe, Mn). Há hipóteses que explicam isso e elas afirmam que pode ocorrer que a reação sofra precipitação do P, e o micro, nos vasos condutores, tem seu transporte reduzido para a parte aérea, causando a sua deficiência. Outra hipótese coloca que pode haver efeito de diluição do micronutriente, com o maior desenvolvimento da planta, devido à aplicação do P e, assim, causar sua deficiência na planta. Dessa forma, o uso de P em excesso pode induzir sintomas de deficiências desses micronutrientes. Além disso, o excesso de fósforo pode deprimir a fixação de CO<sub>2</sub> e a síntese de amido (Marschner, 1986).

<b>DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA</b>	<b>NUTRIENTE: FÓSFORO</b>
<b>FOTOS</b>	<b>DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS</b>
 <p>(a) (b)</p>	<p>Lâminas foliares verde-escuras a verde-azuladas; coloração vermelha ou roxa aparece freqüentemente, particularmente nas pontas e margens expostas diretamente à luz; folhas mais finas, mais estreitas e mais curtas que o normal; folhas mais velhas amarelas, eventualmente definhando a partir das pontas e ao longo das margens; colmos menores e mais finos; perfilhamento escasso (Foto 1a) e um detalhe da planta deficiente com ausência de perfilhamento (Foto 1b).</p>
<b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b>	
 <p>(a) (b)</p>	<p>Cor verde-escura das folhas mais velhas seguindo-se tons roxos nas pontas e margens, atingindo também o colmo (Foto 2a) e isto leva diminuição no crescimento das plantas (Figura 2b – planta a direita deficiente e a esquerda normal)</p>
<b>Foto 2. MILHO</b>	
 <p>(a) (b)</p>	<p>As folhas inferiores com coloração verde pálido e as superiores com tons verdes mais escuros (foto 3a). Os folíolos das folhas mais velhas podem apresentar áreas internervais cloróticas. Com evolução dos sintomas as folhas velhas tornam-se necróticas e tem-se menor desenvolvimento da planta (Figura 3b).</p>
<b>Foto 3. FEIJÃO</b>	
 <p>(a) (b)</p>	<p>A folha toma uma cor verde escura e depois amarelo-laranja; em casos extremos podem aparecer pontas ou manchas queimadas (Foto 4a); frutos ásperos, esponjosos, com o centro oco e excessivamente ácidos e o albedo fica mais espesso (Foto 4b).</p>
<b>Foto 4. CITRUS</b>	
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>	

**Figura 61.** Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de P em diversas culturas.

## Capítulo 7 Potássio

### 7.1 Introdução

Em geral, os solos tropicais apresentam baixa concentração de potássio disponível; entretanto, não é tão baixo como ocorre com o fósforo. O potássio é, depois do fósforo, o segundo nutriente mais consumido na agricultura brasileira.

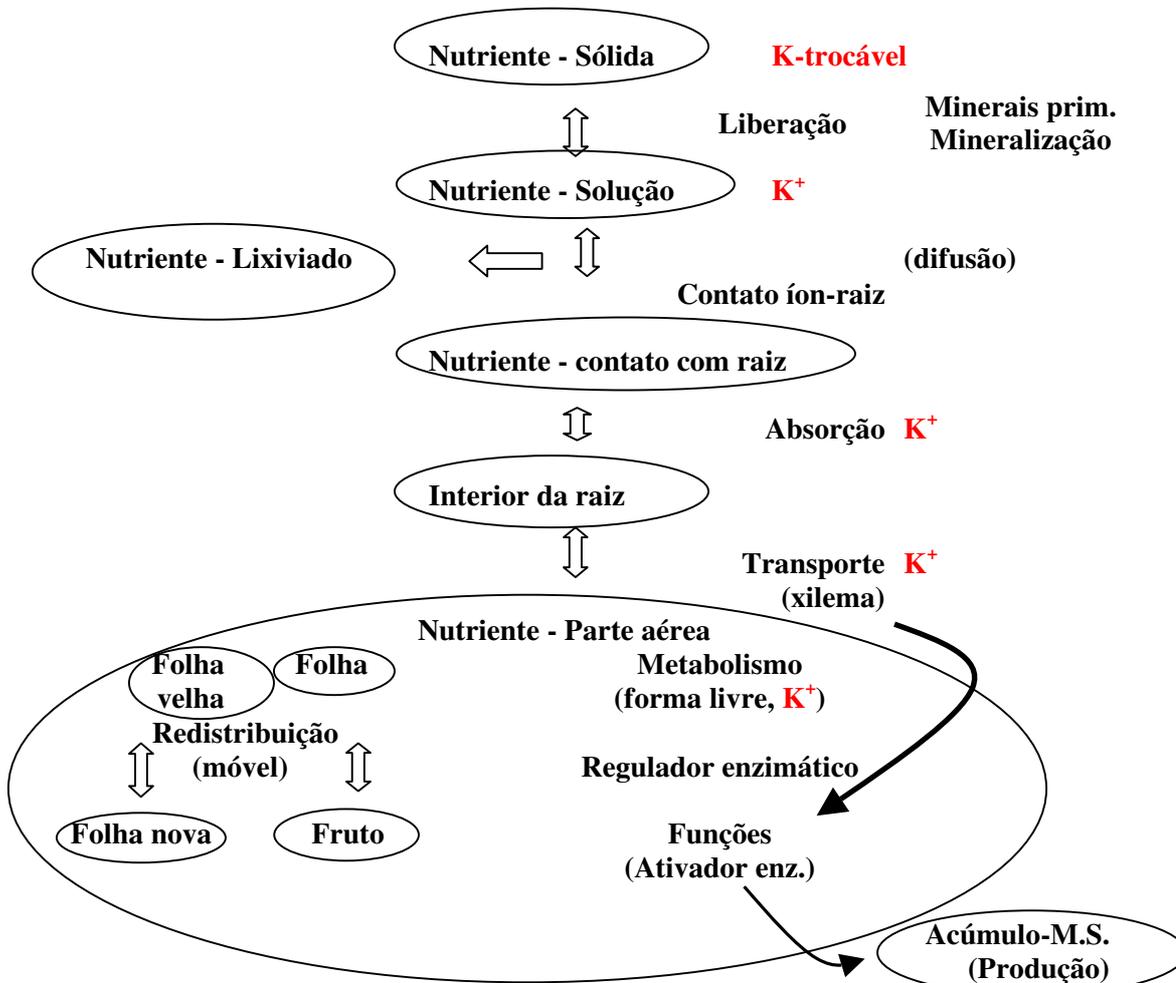
Diferentemente do N e S, a principal forma do K no solo é a mineral, podendo estar na rede cristalina de minerais primários – feldspatos, micas (muscovita e biotita) ou em minerais secundários (argilas do tipo 2:1, ilita e vermiculita. Com o intemperismo do solo, os minerais ricos em potássio diminuem, dando lugar às argilas 1:1, como a caulinita, que não tem potássio em sua estrutura.

Além do K estrutural dos minerais, tem-se o K-fixado ou não-trocável e o K-fertilizantes que “alimentam” o compartimento K-trocável, e por fim o K-solução que por sua vez permite a sua absorção pela planta. O K não-trocável compreende o K adsorvido nas entrecamadas de minerais de argila 2:1 e uma parte do K contido em minerais primários de mais fácil intemperização (Mielniczuk & Selbach, 1978). Assim, o nutriente na forma de cátion trocável e na solução do solo, são consideradas como disponíveis para as plantas. Os teores trocáveis, em geral, pouco representam em relação aos teores totais, mas em solos tropicais, eles podem ser a reserva mais importante do potássio disponível.

Acrescenta-se, ainda, que a matéria orgânica apresenta o K trocável e, também, como parte da sua constituição, a qual é liberada por lavagem e no processo de mineralização.

No solo, diversos fatores afetam a disponibilidade de K, como teor de argila, temperatura, o umedecimento e secagem do solo, além do valor pH, sendo que próximo de 6,5 aumenta a sua disponibilidade.

No estudo do potássio no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre, desde a solução do solo; raiz e parte aérea (Figura 62).

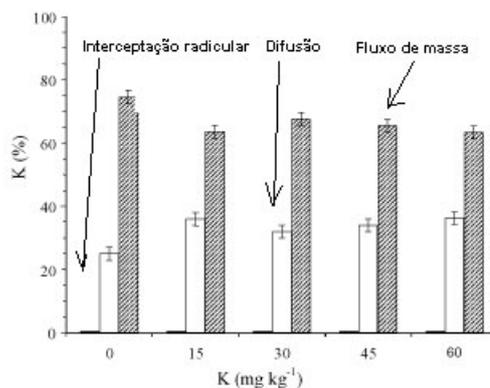


**Figura 62.** Dinâmica do potássio no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

## 7.2 Absorção, transporte e redistribuição do potássio

### a) Absorção

Antes de ocorrer à absorção, tem-se o contato K-raiz. Para isso tem que ocorrer caminhamento do potássio no solo até as raízes. Normalmente, o K move-se no solo pelo fenômeno da difusão que predomina (Tabela 10), especialmente quando o fluxo de massa é reduzido pelo baixo conteúdo de água e alto de argila do solo (Grimme, 1976) porém, em condições de vaso, com raízes concentradas em volume de solo restrito, e em solo corrigido, poderá favorecer o fenômeno de fluxo de massa (Rosolem et al., 2003) (Figura 63). De toda a forma, a umidade adequada do solo pode afetar o contato com a raiz e a sua absorção. Neste, sentido, o nível adequado de umidade no solo aumenta a absorção de K no milho, refletindo maior produção de matéria seca (Tabela 37).



**Figura 63.** Porcentagem do K em contato com raiz do algodão cultivado em vaso pelos processos da interceptação radicular, da difusão e do fluxo de massa em função das doses de K (Rosolem et al., 2003).

**Tabela 37.** A umidade do solo na absorção de potássio pelo milho e a produção de matéria seca (Adaptado de Mackay & Barber, 1985b).

	Nível de umidade		
	Deficiente (-170kPa)	Adequado (-33kPa)	Excessivo (-7,5kPa)
K absorvido (mmol por vaso)	2,9	5,0	4,6
Matéria seca (g por vaso)	7,8	8,7	7,3

K (solo)=207 mg dm<sup>-3</sup>

O potássio é absorvido pelas raízes na forma iônica  $K^+$  ocorre por vários sistemas (transportadores e em canais). Sendo que no transporte de  $K^+$ , tem-se o sistema de alta afinidade ( $K_m$  baixo = 0,02 e 0,03 nM) é atribuído ao transporte ativo por carregador e muito seletivo e o de baixa afinidade  $K_m$  alto é pouco seletivo. O primeiro sistema a absorção do K ocorre por uma força de próton ou seja ocorre troca do  $H^+$  por  $K^+$ , embora a quantidade de  $K^+$  que entra na célula seja bem superior a quantidade de  $H^+$  liberado ao meio. E o segundo sistema é um processo passivo de difusão facilitada, através de canais seletivos até o citoplasma (Fox & Guerinot, 1998).

Além destes sistemas de absorção de K, têm-se uns canais na membrana plasmática, por troca de voltagem, que dependem da atividade da bomba protônica, permite a entrada de diversos cátions.

A absorção de K através do mecanismo de baixa atividade, ou seja, com alta concentração do K no meio e pelos canais operados pela bomba protônica, poderá ser afetado pela presença de outros íons no meio, visto que tratam de processos pouco seletivos. Entretanto, o processo de absorção importante para nutrição

das plantas em solos tropicais (teor baixo de K) seria os processos que atuam com alta afinidade ou KM baixo.

Os canais são eficientes na absorção deste nutriente, ainda que em concentrações baixas (10  $\mu\text{M}$ ) (Hirsch et al., 1998). Neste processo, podem interferir o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , que em concentrações elevadas podem inibir a absorção de potássio. Normalmente, na membrana plasmática, o K é permeável, facilitando a sua absorção, embora predomina forma ativa. Por fim, as informações aprofundadas a respeito dos processos de absorção de K nas plantas, pode ser obtido em uma revisão de literatura recente feito por Malavolta (2005).

Salienta-se, ainda, que a idade da planta favorece a absorção de K, sendo que a raiz mais jovem apresenta maior absorção, se comparada com a mais velha.

#### **b) Transporte**

Após a sua absorção, o K é transportado facilmente e rapidamente, via xilema, para a parte aérea.

#### **c) Redistribuição**

A redistribuição interna do K é alta, dirigindo-se das folhas velhas para as mais novas. Normalmente o destino é para os tecidos meristemáticos ou para o fruto que está crescendo; isto se deve, em parte pelo menos, ao fato de que cerca de 75% do potássio total da planta encontra-se na forma solúvel ( $\text{K}^+$ ), ou seja, não está ligado a um composto orgânico.

### **7.3 Participação no metabolismo vegetal**

Diferentemente do N, o potássio não faz parte de nenhum composto orgânico na planta; portanto, não tem função estrutural. Entretanto, sua principal função na vida das plantas é de ativador enzimático. Mais de 60 enzimas dependem do potássio para a sua atividade normal. O K está relacionado às mudanças na conformação das moléculas, a qual aumenta a exposição dos sítios ativos para ligação com o substrato. Em geral, as mudanças de conformação induzidas pelo  $\text{K}^+$  nas enzimas, aumenta a taxa das reações catalíticas ( $V_{\text{max}}$ ) e, em muitos casos, também a afinidade pelo substrato ( $K_m$ ) (Evans e Wildes, 1971).

Uma das razões que explica o fato de as plantas apresentar alto nível de exigência em potássio (normalmente 2º nutriente mais exigido) é a necessidade que a planta tem de manter o seu teor elevado no citoplasma das células, principalmente para garantir uma ótima atividade enzimática, pois este nutriente não tem alta afinidade com compostos orgânicos (inclusive enzimas). Um outro motivo, da necessidade de alta

concentração do K no citosol e no estroma dos cloroplastos é para manter a neutralização de ânions (ácidos orgânicos e inorgânicos solúveis e ânions de macromoléculas) e manutenção do pH nos níveis adequados para o funcionamento da célula, isto é pH de 7,0-7,5 no citosol e ~8,0 no estroma (Marschner, 1995).

Assim, em plantas deficientes em K, tem-se diminuição do metabolismo da planta, com maior acumulação de carboidratos solúveis, decréscimo no nível de amido (K ativa amido sintetase) e acúmulo de compostos (N-solúvel). Além disso, existem também prejuízos na síntese protéica, sendo provável que o K ative a redutase do nitrato e o mesmo, seja requerido também na síntese desta enzima. Salienta-se, ainda, que o K por manter pH ideal para atividade enzimática beneficiará a atividade da redutase, pois segundo Pflüger e Wiedemann (1977) o decréscimo no pH de 7,7 para 6,5, quase inibe, completamente, a atividade desta enzima. Além disso, o K participa em várias etapas da síntese protéica, como síntese de ribossomas e de aminoacil tRNA; ligação de aminoacil tRNA a ribossomas; transferências de peptidil tRNA e ribossomas e despolimerização de mRNA depois da síntese da proteína (Evans & Wildes, 1971, citado por Malavolta, 1984).

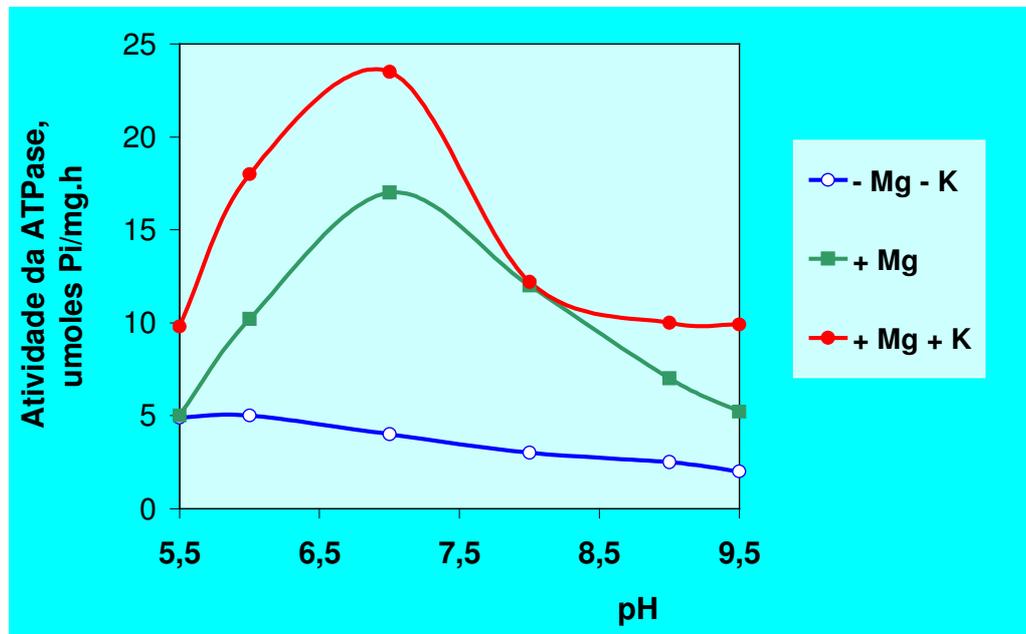
Esta queda da síntese de proteína, provoca também acúmulo de aminoácidos básicos (ornitina, citrulina e arginina) que sofrem descarboxilação, levando ao aumento do teor de putrecina, composto nitrogenado tóxico às plantas (Tabela 38) (Malavolta & Crocomo, 1982). Salienta-se, ainda, que a queda do valor pH do citosol, favorece a ação de enzimas que participam da síntese destes compostos. Assim, o acúmulo da putrecina pode levar à necrose das margens/pontas das folhas, fato este comum em plantas deficientes em K.

**Tabela 38.** Aminoácidos, aminas, N total, proteína e potássio em folhas de gergelim (38 dias de idade) influenciadas pelo nível de K (Malavolta & Crocomo, 1982)

Componente	+K	-K
	mmol/g m.s.	
Arginina	72	115
Citrulina	118	377
Ornitina	45	117
Agmatina	20	29
N-carbamilputrecina	26	92
Putrecina	114	1000

As ATPases bombas de prótons ligadas às membranas celulares, que atuam no processo de absorção iônica, requerem, para sua máxima atividade, o  $Mg^{2+}$  e também o  $K^+$  (Figura 64), exceto a ATPase do

tonoplasto, que não requer o  $K^+$ . Essa ativação, não somente facilita o transporte de  $K^+$  da solução externa, através da membrana plasmática, dentro das células das raízes, mas também, torna o nutriente mais importante na regulação osmótica. As ATPases, por sua vez, são importantes no crescimento de células meristemáticas, que influenciam o próprio crescimento da planta.



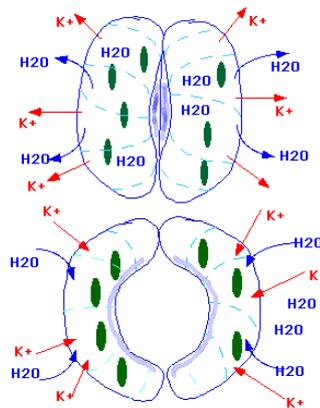
**Figura 64.** Atividade da ATPases de fração de membrana de raízes de milho, influenciada pelo pH, Mg e K (Adaptado de Marschner, 1986).

O potássio também é muito importante na expansão celular. A expansão celular envolve a formação de um grande vacúolo central, que ocupa 80 a 90% do volume celular. Há duas condições para que ocorra a extensão das células: um aumento na capacidade de extensão da parede celular e o acúmulo de soluto para criar um potencial osmótico interno. Na maioria dos casos, a expansão das células é uma consequência do acúmulo de  $K^+$ , que é necessário, tanto para a estabilização do pH no citoplasma, quanto para aumentar o potencial osmótico nos vacúolos.

Assim, o potássio além de ser um potente ativador enzimático, exerce uma função física fundamental a fisiologia das plantas, que seria na abertura e fechamento dos estômatos. Barraclough & Leigh (1993), observaram que o teor crítico de K no tecido vegetal para exercer a função física é cerca de 2,7 vezes maior que para exercer a função enzimática, entretanto, se for fornecido o Na, a relação poderia diminuir (~1,7

vezes). Os autores, acrescentam ainda que o Na não alterou o teor crítico de K para exercer a atividade enzimática.

Deste modo, o K é o principal nutriente que afeta o potencial osmótico na planta, influenciando desde a expansão celular, transporte de íons, pois gera potencial osmótico alto na raiz, até na abertura e fechamento dos estômatos. O  $K^+$  (especialmente do vacúolo) influencia o ótimo turgor nas células guarda, pois ele eleva o potencial osmótico destas células, resultando em absorção de água das células guarda e adjacentes e conseqüentemente o maior turgor e a abertura dos estômatos, conforme ilustra o esquema abaixo (Figura 65). As plantas com a cutícula turgida, oferece maior resistência física à danos mecânicos ou aos microorganismos.



**Figura 65.** Esquema do movimento dos estômatos influenciado pelo K.

Assim, a baixa perda de água pelas plantas bem-supridas em potássio é devido à redução na taxa de transpiração, a qual não depende somente do potencial osmótico das células, mas também é controlada pela abertura e fechamento dos estômatos. Portanto, plantas bem-supridas em K têm maior eficiência no uso da água, a exemplo na cultura do milho (Tabela 39). Assim, em período de “veranico” com estresse hídrico, as plantas bem-supridas de K mantêm mais água nos tecidos em relação às plantas deficientes (Neiva, 1977).

**Tabela 39.** Eficiência no uso da água pela cultura do milho em relação à nutrição potássica (Neiva, 1977).

$K_2O$ kg ha <sup>-1</sup>	Uso de água L m <sup>-2</sup>	Coefficiente transpiração L por kg de M.S.	Eficiência uso de água L kg <sup>-1</sup> grão
0	375	276	573
465	330	203	379
930	320	198	360
1395	317	171	323
D.M.S.5%	5	40	54

Salienta-se, que o estresse (hídrico ou salinidade) induz o fechamento estomático, pelo fato que as plantas nestas condições produzem na raiz, o hormônio ABA que é transportado, via xilema, para folhas, induzindo efluxo de  $K^+$  das células guardas dos estômatos. O efeito do ABA é devido ativação de canais de  $Ca^{2+}$  nas membranas das células-guarda, aumentando o Ca citoplasmático, promovendo despolarização destas membranas, conseqüência disso, ativa as passagens de ânions dependentes de voltagem e, assim, induz a membrana plasmática de um estado de condução de  $K^+$  para um estado de condução de ânions, o qual, de forma suplementar, diminui o potencial da membrana e o que induz esta saída de  $K^+$  das células-guarda e fechamento dos estômatos (Hendrich et al., 1990).

Este controle da abertura/fechamento dos estômatos também é importante na taxa de fotossíntese, pois em plantas deficientes em K, a abertura dos estômatos não ocorre regularmente, diminuindo a entrada de  $CO_2$ . Assim, a aplicação de K pode aumentar a assimilação de  $CO_2$  pelas folhas e também a área foliar (Tabela 40). Além disso, os cloroplastos contêm cerca da metade do K foliar. Assim o K, promove maior difusividade do  $CO_2$  nas células do mesófilo e também ativa carboxilase RuBP, contribuindo para maior atividade fotossintética. Por outro lado, todos os nutrientes que afetam a bioquímica da fotossíntese, aumenta a concentração de  $CO_2$  nas células dos estômatos podendo induzir seu fechamento. Por fim, o K é o responsável principal pelo fluxo de  $H^+$ , induzido pela luz, através das membranas dos tilacóides (Tester e Blatt, 1989) e também pelo estabelecimento do gradiente de pH trans-membranas, necessário para a síntese de ATP (fotofosforilação), em analogia com a síntese de ATP na mitocôndria.

**Tabela 40.** Efeito do potássio sobre a assimilação de  $CO_2$ , e o crescimento de área foliar em milho cultivado em solução nutritiva (Adaptado de Steineck & Haeder, 1978).

K na solução $\mu g\ cm^{-3}$	Assimilação de $CO_2$ $mg/cm^2 \times h$	Área foliar $cm^2$
15	22,6 (100)	51,9 (100)
45	28,8 (127)	51,9 (100)
135	32,8 (145)	53,6 (103)
400	35,3 (156)	59,8 (115)

Intensidade de luz=7,5 lúmen/cm<sup>2</sup>.

Acrescenta-se, ainda, que plantas bem nutridas em potássio têm apresentado maior retenção de água nos tecidos e tolerância ao estresse climático (secas e geadas). Quanto as geadas, o K pode aumentar o ponto de congelamento dos tecidos por induzir mais teor de solutos nas células, amenizando os danos da baixa

temperatura. Deste modo, Grewal & Singh (1980) verificaram na cultura da batata que aplicação de potássio, além de aumentar a produção e teor foliar, promoveu menor dano nas folhas pelo congelamento (Tabela 41).

**Tabela 41.** Efeito da aplicação de potássio na produção de tubérculos, no teor foliar e porcentagem de folhas danificadas pelo congelamento, em batata (Valores médios de 14 locais)

Doses de K (kg ha <sup>-1</sup> )	Produção de tubérculos (t ha <sup>-1</sup> )	K foliar (mg g <sup>-1</sup> de material seco)	Folhas danificadas pelo congelamento (%)
0	2,39	24,4	30
42	2,72	27,6	16
84	2,87	30,0	7

Diversos trabalhos têm atribuído ao potássio o transporte de fotossintatos no floema, sendo este um processo ativo, que requer energia a partir da atividade das ATPases nas membranas. Assim, o K favorece a passagem ativa de fotoassimilados pelas membranas dos tubos crivados e também favorece o fluxo passivo dos solutos dentro dos tubos, pois o mesmo mantém o pH alto, facilitando assim o transporte da sacarose. O transporte de solutos ou fotossintatos é importante em todos os estádios de desenvolvimento das culturas. Na fase reprodutiva muito das vezes a maior parte dos nutrientes que seria drenado para os frutos em desenvolvimento, não provém das raízes e sim das folhas ou caule.

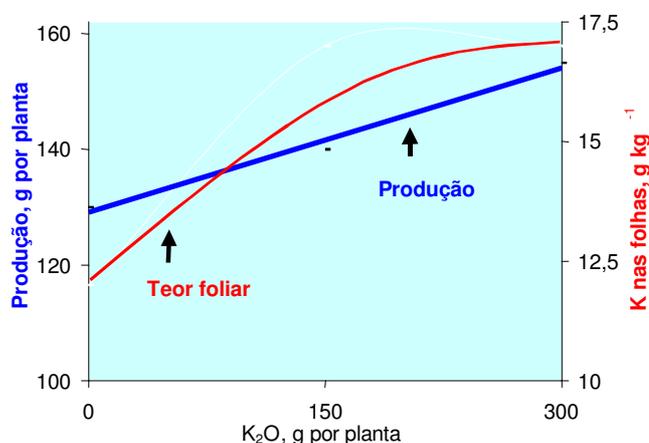
Em cana-de-açúcar, plantas bem-supridas em potássio, após 90 minutos, 50% dos compostos fotossintetizados (<sup>14</sup>C) foram exportados da folha para outros órgãos e 20% do total já estavam nos tecidos de reserva (colmo). Em situação de deficiência, mesmo após 4 horas, as taxas de transporte foram bem menores (Hartt, 1969, citado por Marschner, 1986). Em eucalipto verificou-se que a aplicação de K promoveu maior transporte de carboidratos das folhas para o lenho, conseqüentemente resultou em maior acúmulo de celulose e de hemicelulose no lenho (Silveira & Malavolta, 2003).

As plantas deficientes em K podem diminuir a síntese de parede celular (em hastes/caule) predispondo a cultura a ventos, provocando seu tombamento.

Devido aos seus diversos papéis na planta, o potássio tem efeitos diretos na produção da maioria das culturas. Assim tomando como exemplo a cultura do maracujazeiro, Carvalho et al. (1999) observaram que a dose de 434 g por planta esteve relacionada com a maior produção de frutos de maracujá, enquanto a produção máxima de suco foi obtida quando se aplicaram 562 g por planta/ano. Esta quantidade de K foi

30% superior àquela que proporcionou a maior produtividade de frutos. Nos citros, a aplicação de K elevou seu teor nas folhas e, conseqüentemente, houve maior produção de frutos (Figura 66).

O papel do K no transporte pode também afetar o conteúdo de proteínas nos grãos, incrementando a sua qualidade. Este fato, ocorre porque o K transporta o N para síntese protéica nos grãos (Blevins,1985).



**Figura 66.** Efeito de doses de potássio no teor foliar de K e produção do citros (Adaptado de Malavolta et al., 1997).

O potássio também pode aumentar a qualidade da soja, a partir do aumento da isoflavona. A isoflavona é considerada um componente alimentar funcional para a saúde humana, reduzindo índice de doenças (câncer, doenças cardiovasculares, osteoporose). Bruulsema (2001) verificou que a aplicação de K na soja aumentou o elemento na planta, a produção e também o conteúdo da isoflavonas (Tabela 42).

**Tabela 42.** Efeito do potássio no conteúdo de isoflavonas, produção, teor de K na planta (Bruulsema, 2001).

Dose de K	Isoflavona (total)	Produção kg ha <sup>-1</sup>	K foliar	K na semente %
Com K (101 kg ha <sup>-1</sup> )	1389	2489	2,1	1,7
Sem K	1145	2152	1,6	1,4
Diferença (%)	21	15	33	19

#### 7.4. Exigências nutricionais das principais culturas

O estudo da exigência nutricional das culturas deve refletir a extração total do nutriente do solo, respeitando a extração em cada fase de desenvolvimento da cultura, para satisfazer às necessidades nutricionais das culturas, visando à máxima produção econômica.

Salienta-se que o teor total de K na planta para crescimento/ desenvolvimento ótimo é de 2-5% (20-50 g kg<sup>-1</sup>) do peso seco; entretanto, estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores, que serão objetos de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Dessa forma, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente e a marcha de absorção deste nutriente ao longo do cultivo.

#### **a) Extração e exportação de nutrientes**

A extração total de potássio é em função do teor na planta e da quantidade de matéria seca acumulada. Portanto, depende da produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade no solo, do manejo da cultura, entre outros.

Quanto à espécie vegetal, nota-se variação da quantidade exigida em função das culturas (Tabela 43).

Das diversas culturas, observa-se que a extração total de potássio variou de 39 (trigo) até 257 kg ha<sup>-1</sup> (milho) (considerando a produção obtida em um hectare). Entretanto, em valores relativos de extração de potássio, em kg por tonelada produzida, observa-se maior exigência do cafeeiro (116 kg) e menor exigência das gramíneas como trigo (13 kg) e cana-de-açúcar (1,6 kg).

Quanto à exportação de K no produto colhido por área, observa-se que a cana-de-açúcar é a que exporta mais (65 kg ha<sup>-1</sup>), tendo em vista que toda a parte colhida é exportada; enquanto por tonelada produzida, as culturas anuais, como o feijão e a soja são as que mais exportam 22 e 19 kg t<sup>-1</sup>, respectivamente; portanto, é importante a adubação de restituição para estas culturas.

É pertinente salientar ainda, que mesmo dentro da mesma espécie existem diferenças grandes na quantidade de K absorvido e exportado pelas colheitas. Em citrus, Bataglia et al. (1977) verificaram que os frutos da lima tahiti e da laranja Natal tem exportação contrastante, por caixa de frutos, variando de 48 a 102 g de K<sub>2</sub>O, respectivamente.

#### **b) Marcha de absorção**

O estudo da marcha de absorção (nutriente acumulado em função do tempo de cultivo) é importante porque permite determinar as épocas em que os elementos são mais exigidos e corrigir as deficiências que, porventura venham a ocorrer durante o desenvolvimento da planta.

**Tabela 43.** Exigências de potássio das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida	K acumulado		K requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup>
			Parte da planta	Total <sup>(3)</sup>	
		t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>		kg t <sup>-1</sup>
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	24 (18,5) <sup>(2)</sup>		66
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	39		
	Raiz	0,5	3		
<b>Soja</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (vagens)	3	57 (19)		115
	Caule/ramo/folha	6	58		
<b>Feijão</b>	Vagem	1	22 (22)		92
	Caule	0,4	11		
	Folhas	1,2	57		
	Raiz	0,1	2		
<b>Milho</b> <sup>(1)</sup>	Grãos	6,4	30 (4,7)		257
	Restos culturais	-	237		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	13 (4,3)		111
	Colmos	2	60		
	Folhas	2	12		
	Casca	1	6		
	Raiz	1	20		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	12 (4,0)		39
	Palha	3,7	27		
<b>semi-perene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	65 (0,65)		155
	Folhas	25	90		
<b>Cafeeiro</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (coco)	2	52 (26)		232
	Tronco, ramos e folhas	-	180		

<sup>(1)</sup>Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (kg t<sup>-1</sup>): K acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de K da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: K acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

Na cultura do algodoeiro, Mendes (1965) obteve a marcha de absorção acumulativa, em todo o ciclo de desenvolvimento das plantas, que durou 150 dias (Tabela 44). Observa-se absorção inicial lenta; em seguida, no florescimento, atingiu-se 50% (fase inicial) até 73% (fase final). Na fase inicial de deiscência, a absorção atingiu os 86%, completando com os 100% na fase final, aos 130 dias. Nota-se que logo no início

do florescimento, a metade do K exigido pela cultura, já foi absorvida, indicando que nessa época, a maior parte do K já deve ter sido aplicado em adubação de cobertura.

Cabe salientar que, no caso do potássio, muitas vezes, o parcelamento excessivo pode resultar em diminuição da produção de matéria seca. Assim, no caso do milho, tem-se uma elevada taxa de acumulação do K nos primeiros 30 a 40 dias, sugerindo que a aplicação deve anteceder este período, na fase inicial do desenvolvimento (Tabela 45). Verifica-se que o parcelamento do K, em duas ou três vezes foi o pior tratamento, quando comparado com aplicação total na época do plantio tanto para o acúmulo de matéria seca como na taxa de acamamento.

**Tabela 44.** Marcha de absorção (cumulativa) de potássio do algodoeiro em solução nutritiva (Mendes, 1965)

Dias	Estádio de desenvolvimento	K absorvido, % do total
10		1
20		2
30	Abotoamento	11
40		28
50		43
60		49
70	Florescimento	58
80		64
90		73
100		78
110	Deiscência	86
120		89
130		93
140		95
150		100

**Tabela 45.** Efeito do parcelamento do potássio na acumulação de matéria seca das folhas+colmos, na época do florescimento, e o quebramento de colmos do milho cultivado em LE (Sete Lagoas-MG). (Coelho et al., não publicado)

Dias após a aplicação	kg de K <sub>2</sub> O por ha		Parte da planta	Matéria seca g por planta	Quebramento de colmos %
	30	45			
Plantio	30	45			
90	0	0	Folhas	33	
45	45	-	Folhas	30	
30	30	30	Folhas	27	
90	0	0	Colmos	65	10
45	45	-	Colmos	65	13
30	30	30	Colmos	50	31

### c) Eficiência de uso de K pelas plantas

Fageria (2000), estudou a resposta de 15 genótipos de arroz, em terras altas, ao tratamento zero de K e 200 mg kg<sup>-1</sup> de K (nível alto) no solo. Os genótipos de arroz mostraram diferenças significativas na produção de grãos e no uso de K (Tabela 46).

**Tabela 46.** Eficiência de uso de K pelos 15 genótipos de arroz de terras altas<sup>1</sup> (Fageria, 2000).

Genótipo	Eficiência agrônômica (mg mg <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>	Eficiência fisiológica (mg mg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	Eficiência de recuperação (%) <sup>(4)</sup>	Eficiência de Utilização (ou uso) (mg mg <sup>-1</sup> ) <sup>(5)</sup>
Rio Paranaíba	19,6abc <sup>(1)</sup>	52,8b	87,7a	46,31a
CNA6975-2	6,2bc	34,2b	76,3ab	26,09abc
CNA7690	15,6abc	46,9b	63,6abc	29,83abc
L141	19,8abc	63,2a	64,4abc	40,70ab
CNA7460	12,5abc	43,3b	79,1ab	34,25abc
CNA6843-1	21,8ab	48,9b	76,4ab	37,36abc
Guarani	20,7abc	40,7b	44,3c	18,03c
CNA7127	15,2abc	46,8b	61,6abc	28,83abc
CNA6187	8,9 abc	33,4b	68,2abc	22,79bc
CNA7911	10,8abc	27,5b	60,5abc	16,64c
CNA7645	24,8a	53,6b	80,6a b	43,20ab
CNA7875	-	40,9b	57,3bc	23,44bc
CNA7680	6,6abc	30,4b	54,2bc	16,48c
CNA6724-1	2,7c	29,5b	59,2bc	17,46c
CNA7890	4,0c	28,8b	57,7bc	16,62c

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

<sup>(2)</sup> Eficiência agrônômica (EA) =  $(PG_{cf} - PG_{sf}) / (QN_a)$ , dada em mg mg<sup>-1</sup>, onde: PG<sub>cf</sub> = produção de grãos com fertilizante, PG<sub>sf</sub> = produção de grãos sem fertilizante e QN<sub>a</sub> = quantidade de nutriente aplicado.

<sup>(3)</sup> Eficiência fisiológica (EF) =  $(PTB_{cf} - PTB_{sf}) / (AN_{cf} - AN_{sf})$ , dada em mg mg<sup>-1</sup>, onde: PTB<sub>cf</sub> = produção total biológica (parte aérea e grãos) com fertilizante; PTB<sub>sf</sub> = produção total biológica sem fertilizante; AN<sub>cf</sub> = acumulação de nutriente com fertilizante e AN<sub>sf</sub> = acumulação de nutriente sem fertilizante.

<sup>(4)</sup> Eficiência de recuperação (ER) =  $(AN_{cf} - AN_{sf}) / 100(QN_a)$ , dada em porcentagem, onde: AN<sub>cf</sub> = acumulação de nutriente com fertilizante, AN<sub>sf</sub> = acumulação de nutriente sem fertilizante e QN<sub>a</sub> = quantidade de nutriente aplicado.

<sup>(5)</sup> Eficiência de utilização (EU) ou uso = eficiência fisiológica (EF) x eficiência de recuperação (ER).

As eficiências agrônômica, fisiológica e de uso apresentaram alta correlação com a produção de grãos. Com base na produção de grãos (maior que a média dos genótipos), no baixo nível de K (eficientes) e na eficiência agrônômica de K (maior que a média dos genótipos) (responsivos), os genótipos foram classificados como eficientes e responsivos: Rio Paranaíba, L141 e Guarani.

## 7.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

### a) Deficiência

A deficiência de K leva a alterações em diferentes níveis desde o início na dinâmica do metabolismo a nível bioquímico evoluindo a nível molecular, subcelular, celular até atingir os tecidos. Assim, Malavolta (1984), indica um enfraquecimento das membranas celulares das camadas mais externas, isolamento de cloroplastos em forma de bastonetes ou fusiformes e presença de matéria graxa. E a destruição do cloroplasto, deterioração das mitocôndrias, inchamento dos proplastídeos e afinamento da matriz dos protoplastídeos e posteriormente ocorrem falhas na diferenciação dos tecidos condutores e perda da atividade cambial.

Os sintomas de deficiência de K, nas culturas em geral, caracterizam-se pela clorose marginal e necrose das folhas, inicialmente, as mais velhas. Em algumas culturas, a deficiência de K desenvolve folhas com coloração verde-escura ou verde-azulada, semelhante à deficiência de P. Tem-se menor translocação de carboidratos da parte aérea para a raiz, reduzindo o crescimento das raízes.

Híbridos de milho altamente produtivos têm alta capacidade de transporte de fotossintatos do caule para o enchimento de grãos. Assim, em culturas supridas adequadamente com K, tem-se alta produção de fotossintatos para suprir o enchimento de grãos e garantindo níveis adequados no caule. Portanto, em plantas deficientes em K, o caule das plantas fica enfraquecida, com menor espessura da parede celular, podendo causar colapso dos tecidos do parênquima resultando, em maior taxa de acamamento das plantas.

Salienta-se, também, que plantas deficientes em K tem-se queda do pH do citosol, aumenta-se atividade de algumas hidrolases ( $\beta$ -glicosidase) ou oxidases (polifenol), onde se observa acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, acúmulo de açúcares e portanto muda-se a composição química da célula e também tem-se aparecimento de uma parede celular mais fina, o que torna a planta mais vulnerável ao ataque de patógenos (Mengel & Kirkby, 1987).

A senescência prematura das folhas (algodoeiro) pode ocorrer devido as alterações metabólicas causadas pela deficiência de K (Wright, 1999). Assim, o potássio, atuando na regulação osmótica e resistência das plantas ao estresse hídrico, faz com que plantas com nutrição adequada desse elemento

apresentem níveis mais baixos de ácido abscísico (ABA), fito-hormônio que acelera a senescência foliar (Beringer & Trolldenier,1979).

**b) Excesso**

Os sintomas de excesso de potássio confundem-se, também, com os danos causados pela salinidade, que é alta nos principais fertilizantes potássicos. O alto teor de K nas plantas, pode ocorrer por deficiência induzida de cálcio e magnésio. Por outro, nas doses altas de K pode ocorrer indução de deficiência de outros nutrientes como o Mg.

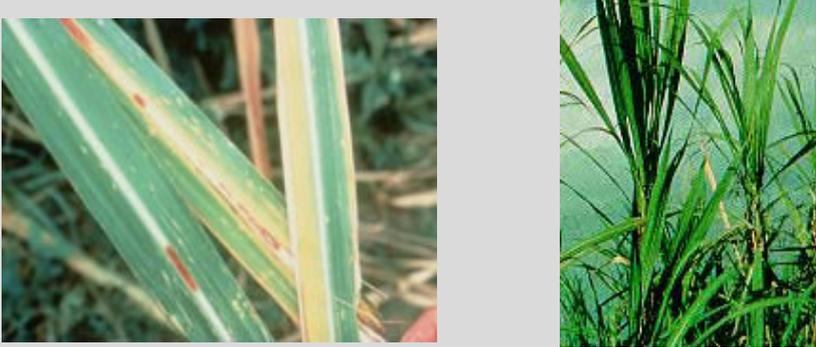
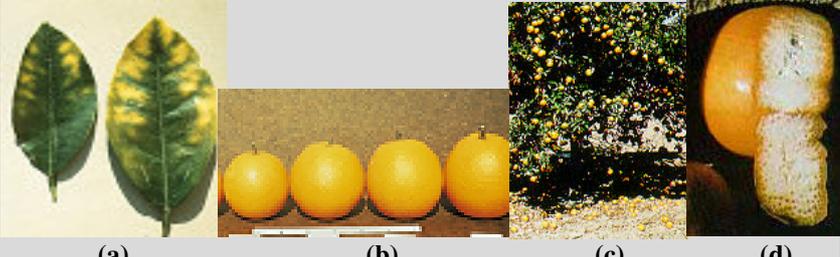
DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA	NUTRIENTE: POTÁSSIO
FOTOS	DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
 <p>(a) (b)</p>	<p>As bordas e entre as nervuras das folhas mais velhas apresentam clorose de cor amarela (Foto 1a) e podem tornar-se necróticas e também manchas avermelhadas na nervura; colmos mais finos. As folhas mais novas geralmente permanecem verde-escuras; cartucho distorcido, produzindo "topo de penca" ou aparência de "leque" (Foto 1b).</p>
Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR	
 <p>(a) (b) (c)</p>	<p>Clorose inicia-se nas folhas novas das plantas (Foto 2a). Nas folhas a clorose ocorre nas pontas e margens das folhas mais velhas seguida por secamento, necrose ("queima") (Foto 2b); colmos com internódios mais curtos e plantas com tamanho reduzido (Foto 2c – planta a esquerda deficiente e a direita normal).</p>
Foto 2. MILHO	
 <p>(a) (b) (c)</p>	<p>As folhas inferiores com coloração verde pálido e as superiores com tons verdes mais escuros. Os folíolos das folhas mais velhas podem apresentar áreas internervais cloróticas (Foto 3a). Com evolução dos sintomas as folhas velhas tornam-se necróticas e tem-se menor desenvolvimento da planta (Figura 3b) e diminui o número de vagens por planta (Foto 3c – a esquerda planta deficiente e a direita planta normal).</p>
Foto 3. FEIJÃO	
 <p>(a) (b) (c) (d)</p>	<p>Manchas amareladas na metade distal da folha (Foto 4a); as manchas inicialmente amarelo-pálidas tornam-se bronzeadas à medida que se espalham e coalescem e podem se enrolar; as folhas velhas são persistentes, ao contrário das deficientes em Ca, com as quais podem se assemelhar; frutos pequenos (foto 4b); queda de frutos (Foto 4c); trincas nos frutos (Foto 4d) e menor resistência à seca e a geadas.</p>
Foto 4. CITRUS	
Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)	

Figura 67. Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de K em diversas culturas.

## Capítulo 8 Cálcio

### 8.1 Introdução

A origem primária do cálcio é nas rochas, contido em minerais como a dolomita, calcita, feldspatos e antibólitos, que ocorre também, em rochas sedimentares e metamórficas. Em solos ácidos, 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 como componente da matéria orgânica. Em condições de pH elevado, o Ca pode precipitar como carbonatos, fosfatos ou sulfatos, com pouca solubilidade. O Ca considerado disponível para as plantas é aquele adsorvido aos colóides (trocável) e presente na solução do solo ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução dos solos ácidos são bastante baixos. Assim, nestes solos, são utilizados materiais corretivos como calcários (carbonato de cálcio) que, além de corrigir a acidez, também é uma fonte importante de cálcio. Portanto, em solos cultivados em geral, o cálcio não constitui um fator limitante, semelhante ao N e P, para a maioria das culturas.

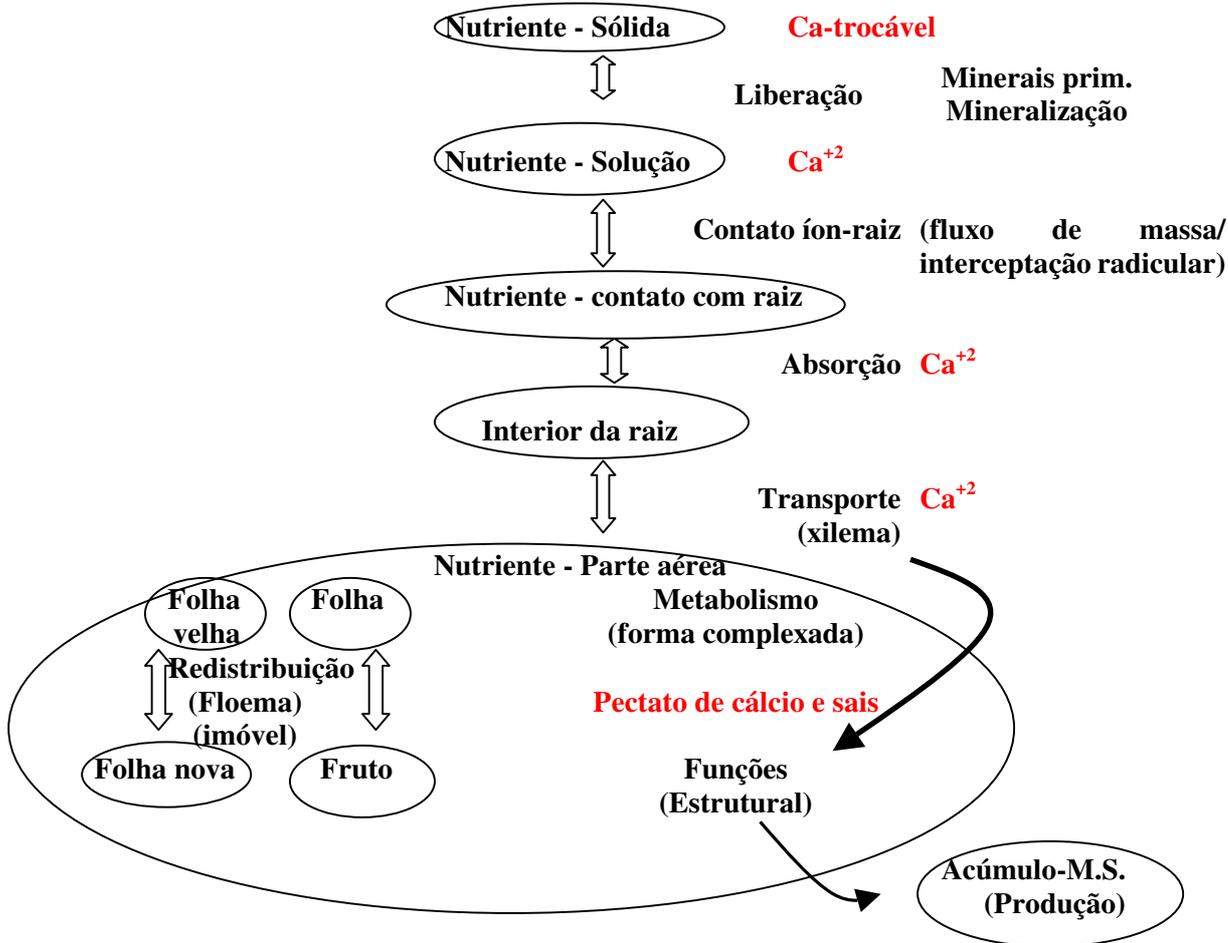
No solo, diversos fatores afetam a disponibilidade de Ca, como o valor pH, sendo aquele próximo de 6,5 em que a disponibilidade é maior.

No estudo do cálcio no sistema solo-planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo, raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até na sua incorporação em um composto orgânico ou como um ativador enzimático, desempenhando funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 68).

### 8.2 Absorção, transporte e redistribuição do cálcio

#### a) Absorção

O caminamento do cálcio no solo até as raízes ocorre não só devido ao fluxo de massa, mas também tem contribuição significativa da interceptação radicular que é caracterizada pelo caminamento nulo no solo, sendo que a raiz, durante seu crescimento, “bate” no Ca. Portanto, a aplicação do cálcio no solo deve ocupar o maior volume, com aplicação a lanço (incorporado na camada de 0-20 cm) para aumentar as chances da raiz fazer o contato com o nutriente, favorecendo o processo de absorção.



**Figura 68.** Dinâmica do cálcio no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

Embora a solução do solo apresente alta concentração de Ca, sendo, por exemplo, 10 vezes maior que a do K, a taxa de absorção do Ca é menor que a do K. Isso ocorre porque a absorção do Ca é feita unicamente nas raízes jovens, nas quais as paredes celulares da endoderme não estão suberizadas, sem estrias de caspary (Clarkson & Sanderson, 1978, citado por Mengel & Kirkby, 1987).

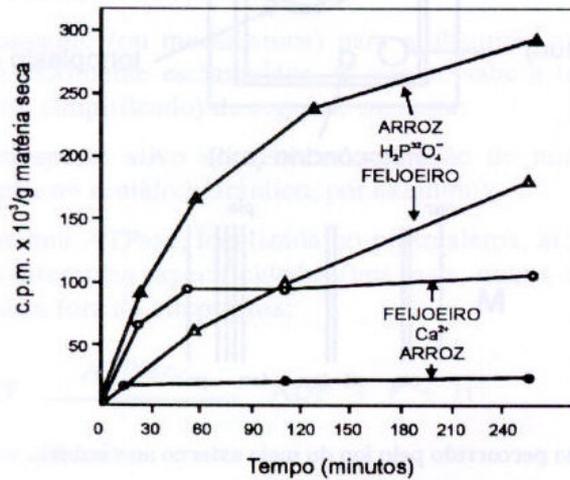
No processo de absorção do isótopo de Ca (marcado), observa-se, nitidamente, em condições de laboratório, que nos primeiros 60 minutos, tem-se uma absorção rápida, indicando o processo passivo e, em seguida, uma absorção, lenta até completar os 240 minutos, caracterizando o processo ativo (Figura 69).

A acidez do solo (alto Al) pode afetar a absorção do Ca pelas plantas. Neste sentido, Marschner (1986) indica que o alumínio pode inibir a absorção de cálcio, principalmente como resultado do bloqueio ou competição nos sítios de troca. Assim, Foy (1984) verificou que a toxicidade de Al pode se manifestar como uma deficiência de Ca induzida, em consequência de redução do transporte do nutriente na planta,

provocando um colapso nos pontos de crescimento em valores de pH < 5,5. O antagonismo Al x Ca talvez seja o fator mais limitante na absorção de cálcio.

## b) Transporte

Após a sua absorção, o Ca é transportado até atingir o xilema e, daí, de forma passiva, para a parte área (por meio da corrente transpiratória).



**Figura 69.** Absorção do Ca e do P pelas culturas de arroz e feijoeiro em função do tempo.

Ressalta-se que na planta, a translocação do cálcio é junto com a água, sendo afetado pela taxa de transpiração. Portanto, órgãos com maior taxa de transpiração recebem maior quantidade de Ca. Nos órgãos que transpiraram pouco, como as folhas novas ou frutos, o transporte do cálcio é dependente das condições ambientais que favoreçam o desenvolvimento da pressão radicular (Bradfield & Guttridge, 1984). A pressão radicular existe quando a transpiração é reduzida a uma taxa menor do que a taxa de entrada de água pelas raízes, como ocorre durante a noite ou em períodos de alta umidade relativa do ar (François *et al.*, 1991). Com a formação da pressão radicular, uma pressão positiva desenvolve-se no xilema causando fluxo do líquido no seu interior, podendo assim, translocar o cálcio para os órgãos com dificuldades para transpirar. A pressão radicular geralmente resulta em gutação (Tibbitts & Palzkill, 1979).

Assim, nestes órgãos com baixa taxa de transpiração, podem ocorrer uma deficiência de Ca, levando aos fenômenos conhecidos como desordens fisiológicas. Assim, estas desordens podem ocorrer em folhas novas, a exemplo do alface o "tipburn" ou "queima dos bordos" (Collier & Tibbitts, 1982) ou em frutos,

como o colapso interno em manga. Portanto, para prevenir estas desordens, tem-se que favorecer maior fluxo de Ca nestes órgãos. Assim, fatores que inibem o desenvolvimento da pressão radicular como seca, vento e alta salinidade promovem aparecimento destes distúrbios (Collier & Tibbitts, 1982). Além desses, existem outros fatores: a alta taxa de crescimento do órgão (alta luminosidade, fotoperíodos, adubação nitrogenada).

### c) Redistribuição

O transporte de Ca nas plantas é unidirecionalmente pelo xilema, das raízes para a parte aérea, sendo que o contrário é muito pequeno, devido à sua concentração no floema ser muito baixa. Isso ocorre porque grande parte do Ca da planta está contido na forma de pectatos de cálcio, constituindo a lamela média das paredes celulares e também de sais cálcicos de baixa solubilidade, tais como carbonato, sulfato, fosfato, silicato, citrato, malato, oxalato. Assim, observa-se que da forma diferente do potássio, o Ca tem baixa solubilidade e concentração no floema, portanto, mobilidade muito restrita na planta (Tabela 47), (Malavolta et al., 1997).

**Tabela 47.** Solubilidade do cálcio contido na planta (Adaptado de Malavolta et al., 1997).

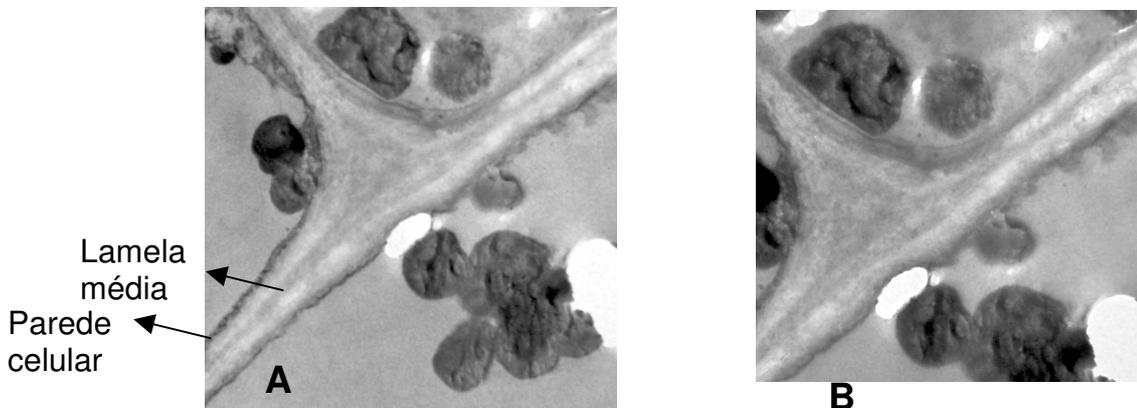
Planta (parte aérea)	Total	Cálcio	
		%	Parte Solúvel <sup>1</sup>
Alfafa	1,3		40
Trigo	1,7		1,8
Milho	0,7		65
Cebola	1,2		28
Batata	1,3		4,6
Tomateiro	2,4		7,7

### 8.3 Participação no metabolismo vegetal

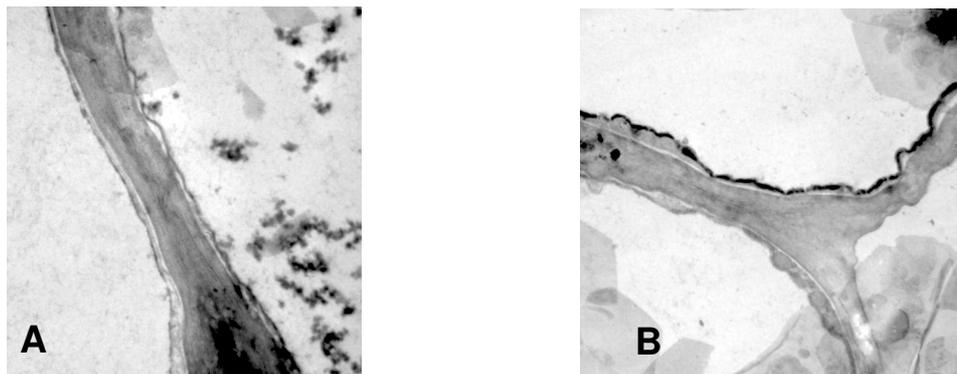
De forma diferente aos demais nutrientes, a maior proporção de Ca está no apoplasto, onde está fortemente retido nas estruturas da parede celular (30-50% do Ca total da planta), também na superfície externa da plasmalema e dentro das células está concentrado no vacúolo e em menor parte no citoplasma. A maior parte do Ca no vacúolo está na forma de oxalato de cálcio, sendo responsável pelo equilíbrio cátion-ânion, mantendo baixa concentração deste elemento no citoplasma.

Uma das principais funções do cálcio é na estrutura da planta, como integrante da parede celular incrementando a resistência mecânica dos tecidos e neutralizador de ácidos orgânicos no citosol.

Normalmente, quando as células crescem, aumenta a superfície de contato entre elas, elevando, também, a necessidade do suprimento de Ca (pectato de cálcio) para formação da pectina, conferindo a alongação da parede celular até atingir o tamanho final, onde será depositada lignina, tornando aí, a parede celular rígida. Além disso, o Ca do pectato de cálcio também faz parte da lamela média (espaço entre duas células adjacentes), que tem a função “cimentante”, isto é, de ligação das células vizinhas. Observa-se que a parede celular de frutos de goiabeira com aplicação de Ca apresentava a lamela média organizada (Figura 70), ao passo que na parede celular em frutos sem aplicação de Ca, a lamela média ficou desestruturada ou ausente (Figura 71).



**Figura 70.** Elétron-micrografias de transmissão de frutos de goiabeira, com detalhe da parede celular, com aplicação de Ca (calcário). A. 10000 X; B. 120000 X (Natale et al., 2005).



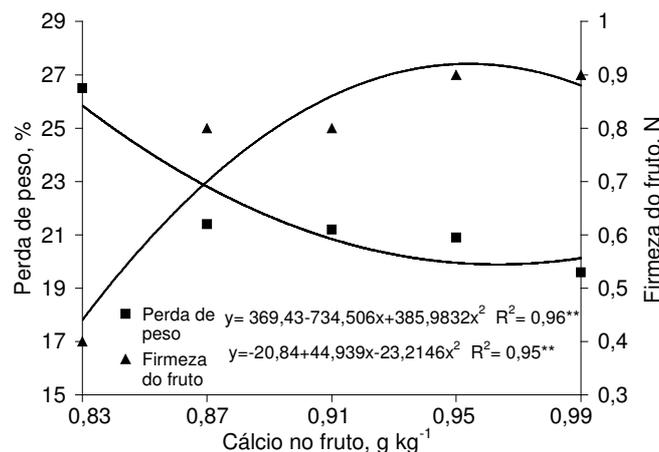
**Figura 71.** Elétron-micrografias de transmissão de frutos de goiabeira, com detalhe da parede celular, sem aplicação de Ca (calcário). A. 10000 X; B. 120000 X (Natale et al., 2005).

Este efeito do Ca na organização da lamela média pode influenciar a textura, a firmeza e a maturação dos frutos (Hanson et al., 1993) e reduzir a taxa de degradação da vitamina C, de produção de etileno e CO<sub>2</sub> e

a incidência de doenças pós-colheita (Conway & Sams, 1983). Assim, Prado et al. (2002), observaram que o aumento do Ca no fruto de goiabeira, promoveu maior firmeza do fruto, e redução da perda de água (Figura 72), isto leva à melhor qualidade pós-colheita, garantindo maior período de armazenamento.

Na membrana celular, o Ca é importante porque interliga grupos fosfatos/carboxílicos de fosfolipídeos e confere estabilidade às proteínas, sobretudo as periféricas (Marschner, 1995). Assim, o Ca é importante para absorção seletiva de íons.

Conforme dito anteriormente, o Ca faz parte da pectina por meio dos pectatos de cálcio, sendo requerido para a alongação e divisão mitótica celular, e isto se reflete no crescimento radicular, sendo que na ausência do suprimento de Ca, o crescimento radicular cessa em poucas horas (Figura 73), podendo morrer. Existem indicações de que o ácido indol acético (AIA) esteja envolvido no transporte do Ca para as regiões apicais da planta (raiz ou ramo); portanto, decréscimo do nível de auxina provoca deficiência de Ca nestes tecidos.



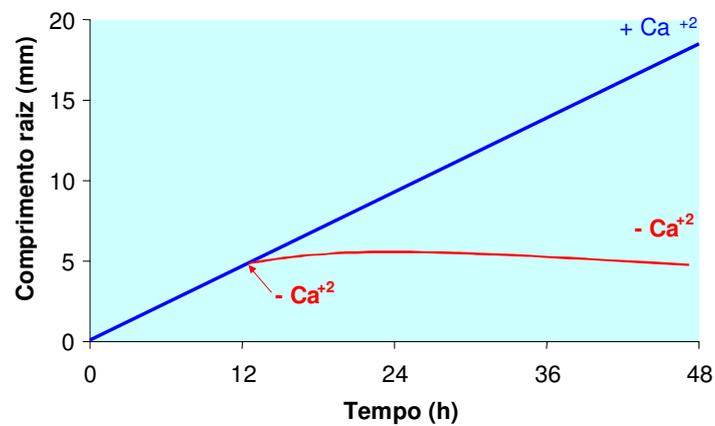
**Figura 72.** Relação entre o teor de cálcio na polpa do fruto, a perda de peso e a firmeza de goiabas, após oito dias de armazenamento em temperatura ambiente (Prado et al., 2002).

Assim, para manter um ótimo crescimento radicular das culturas, é preciso manter a concentração mínima de Ca no solo, entre 2,5-8,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (Adams & Moore, 1983). Uma forma de aumentar a concentração de Ca do solo é por meio da calagem. A saturação por bases do solo próximo de 50%, resultou em maior crescimento radicular em algodoeiro (Figura 74) (Rosolem et al., 2000).

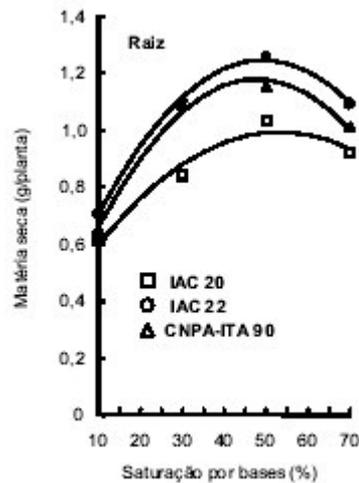
Por outro lado, isso indica que, para um bom desenvolvimento do sistema radicular das plantas, é necessário o Ca ocupar todo o volume de solo, que concentra a maior parte do sistema radicular, especialmente as camadas subsuperficiais do solo (abaixo dos 20 cm), uma vez que, sendo o Ca imóvel na

planta, não ocorre transferência do Ca de raiz suprida com este elemento para outra deficiente. Assim, é importante que a maior parte do sistema radicular esteja em contato com este nutriente. Uma fonte importante de Ca para as camadas subsuperficiais é o gesso agrícola (alta solubilidade=alta mobilidade no perfil do solo).

Uma das funções-chave do cálcio é de manter a integridade estrutural das membranas de várias organelas. Quando há deficiência, as membranas começam a “vazar”, a compartimentação celular é rompida, e a ligação do Ca com a pectina da parede é afetada. A degradação dos pectatos é mediada pela ação da enzima poligalacturonase, a qual é drasticamente inibida por elevadas concentrações de Ca (Tabela 48).



**Figura 73.** Efeito do cálcio no crescimento de raízes primárias do feijoeiro ( $\text{Ca}^{2+}$  na solução = +/- 2mM).



**Figura 74.** Efeito da saturação por bases do solo sobre a matéria seca total de raiz de três cultivares de algodoeiro em condições de casa de vegetação (vasos com 4 L de um Latossolo Vermelho-Escuro) (Rosolem et al., 2000).

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 há um colapso nos tecidos dos pecíolos e das partes mais novas do caule. Além do problema de colapso do caule, também pode ocorrer o aumento da incidência de doenças, uma vez que efluxo de compostos orgânicos de baixo peso molecular das células constitui fonte de alimento para os parasitas, agravando a severidade de doenças. Soma-se a isto, o fato de que no processo de infecção das plantas, os parasitas produzem enzimas pectolíticas que dissolvem a lamela média. A presença de Ca inibe estas enzimas, a exemplo da cultura do tomateiro, em que o Ca reduziu a severidade da murcha de *Fusarium* (Tabela 49).

**Tabela 48.** Efeito do Ca na hidrólise de um pectato pela enzima poligalacturonase

Ca <sup>2+</sup> Mg L <sup>-1</sup>	Quantidade de ácido galacturônico liberado μ mol por 4h
0	3,5
40	2,5
200	0,6
400	0,2

**Tabela 49.** Efeito do Ca na severidade de murcha de *Fusarium* em plantas de tomateiro, após a inoculação

Ca <sup>2+</sup> μg mL <sup>-1</sup>	Concentração de Ca na seiva das plantas	Doença %
0	72	100
50	219	92
200	380	80
1000	1081	9

A concentração de Ca citoplasmático é relativamente baixa (< 0,1μM), em que desencadeia papel enzimático importante, pois ativa a ação da coenzima Ca-calmodulina, pois sem o Ca, esta enzima não tem atividade catalítica. Ca-calmodulina é exigida para a atividade de uma série de outras enzimas (fosfolipases, nucleotídeo, ATPase-Ca das membranas, glutamato descarboxilase, cinase do NAD) e também na síntese da α amilase, que tem o papel de decompor o amido no processo de germinação das sementes (cereais). Entretanto, salienta-se que altos níveis de Ca no citoplasma pode causar reações indesejadas como formação de sais insolúveis (Ca-ATP; Ca-fosfatos) e pode induzir fechamento dos plasmodesmos, reduzindo o transporte radial de íons e até inibir certas enzimas importantes como PEP carboxilase, fosfatases, frutose 1,6 bisfosfatase (síntese sacarose no citosol). Assim, estes altos níveis de Ca não ocorrem devido à ação das ATPases presentes nas membranas que retiram o Ca do citoplasma. Estas ATPases são ativadas pelas Ca-

calmodulinas (composto de baixo peso molecular). A maior parte (90%) das calmodulinas estão localizadas no citosol. Nas raízes, estão principalmente associadas à membrana plasmática (via microtúbulos), sobretudo nos primeiros milímetros do ápice, na região de alta atividade metabólica, ocupada pela coifa, pelo meristema e pela zona de alongamento da raiz.

Salienta-se que o Ca faz parte da estrutura de somente uma enzima (amilase), sendo que nas demais apenas ativa ou faz parte da sua síntese.

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 no funcionamento da plasmalema, sendo detectado elevado teor de Ca no ápice dos tubos polínicos em crescimento. Além disso, para a germinação do grão de pólen tem-se degradação de fitatos pelas fitases, que são ativadas pelo Ca (Scott e Loewus, 1986).

Na fixação biológica do N<sub>2</sub> por leguminosas, os nódulos das raízes necessitam mais de Ca que a própria planta, uma vez formados os nódulos, o processo de fixação e o crescimento da planta ocorrem normalmente, com concentrações relativamente baixas do elemento.

O cálcio tem papel relevante na osmoregulação. Os movimentos dos estômatos são processos típicos que regulam o turgor celular devido a mudanças de potencial osmótico nas células vizinhas e células guardas ou tecidos. Estas mudanças acontecem por fluxos principalmente de potássio, cloreto e malato como componentes osmóticos ativos. A ação do ABA no fechamento do estômato depende das concentrações de cálcio na epiderme das folhas, quais são normalmente bem maiores do que as das outras células. A ativação induzida por ABA nos canais de cálcio e o rápido aumento nas concentrações de Ca<sup>2+</sup> citosólico parecem bloquear as bombas de prótons e abrir canais para ânions, e ambos os eventos levam a perdas de turgor nas células guardas e fechamento dos estômatos, o que pode conferir à planta defesa contra estresses de temperatura e anaerobiose (Atkinson et al., 1990).

Ultimamente, a literatura especializada tem discutido uma outra função importante para o Ca, atuando como mensageiro secundário na condução de sinais para resposta das plantas à fatores ambientais, alterando o metabolismo de crescimento e desenvolvimento vegetal. Estímulos externos (luz, gravidade, mecânicos) e internos (hormônios) atuam sobre os mecanismos transportadores de Ca<sup>2+</sup> modificando seu nível no citoplasma: o estímulo é uma mensagem que é conduzida pelo Ca<sup>2+</sup> como “mensageiro secundário”.

Quando a célula "percebe" a mensagem, o  $\text{Ca}^{2+}$  é descarregado dos seus reservatórios, como o apoplasto, mitocôndrias e retículo endoplasmático no citosol (Malavolta et al., 1997). Salienta-se, para o Ca desempenhar esta função de mensageiro para a transdução de sinais (luz, toque) é necessário manter baixa concentração no citoplasma (0,1-0,2  $\mu\text{M}$ ) (Trewavas & Gilroy, 1991), embora, seja necessário um aumento transitório da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  citosólico (Mansfield et al., 1990).

Deste modo, as pesquisas têm indicado que o Ca atua como mensageiro intracelular acoplado a diversos sinais extracelulares para respostas específicas. Existem descritos quatro grupos de proteínas sensíveis ao cálcio nas plantas: (1) proteínas-quinases dependentes de cálcio; (2) calmodulinas; (3) outras proteínas associadas ao cálcio com motivos "EF-hand" e (4) proteínas associadas ao cálcio sem motivos "EF-hand". De forma indireta, somente as do grupo 1 e 2 estão relacionadas à indução de genes reguladores do estresse (Reddy, 2001). Salienta-se que os mecanismos pelos quais o Ca atua na redução dos efeitos do estresse, carece de informações conclusivas, entretanto, as últimas pesquisas indicam que este nutriente serve como mensageiro em muitos processos de desenvolvimento em respostas ao estresse biótico e abiótico.

Em resumo, Malavolta et al. (1997) descrevem as funções do Ca nas plantas como estrutural e como ativador enzimático, que influenciam diversos processos nas plantas (Tabela 50).

**Tabela 50.** Funções do cálcio nas plantas (Malavolta et al., 1997)

Estrutural	Ativador enzimático	Processos
Pectato (lamela média)	ATPases	Estrutura e funcionamento
Carbonato	$\alpha$ amilase	de membranas
Oxalato	Fosfolipase D	Absorção iônica
Fitato	Nuclease	Reações com hormônios vegetais
Calmodulinas		e ativação enzimática (via calmodulina)
		Mensageiro secundário

#### 8.4. Exigências nutricionais das culturas

O estudo da exigência nutricional das culturas, conforme dito anteriormente, deve refletir a extração total do nutriente do solo, respeitando a extração em cada fase de desenvolvimento da cultura, para satisfazer as necessidades nutricionais, visando à máxima produção econômica.

Salienta-se que o teor total de Ca na planta pode variar de 0,1-0,5% (1-5  $\text{g kg}^{-1}$ ); entretanto, pode atingir 10% (100  $\text{g kg}^{-1}$ ) em folhas velhas. Estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores que serão objetos de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente, e a marcha de absorção deste nutriente.

### a) Extração e exportação do nutriente

A extração total de cálcio é função do teor na planta e da quantidade de matéria seca acumulada. Portanto, depende da produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade no solo, do manejo da cultura, entre outros.

Quanto à espécie vegetal, nota-se variação da quantidade exigida em função das culturas (Tabela 51).

**Tabela 51.** Exigências de cálcio das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca	Ca acumulado	Ca requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup>
		produzida	da Parte da planta Total <sup>(3)</sup>	
		t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg t <sup>-1</sup>
<b>Anuais</b>				
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	11 (8,5) <sup>(2)</sup>	
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	49	61
	Raiz	0,5	1	46,9
<b>Soja<sup>(1)</sup></b>	Grãos (vagens)	3	10 (3,3)	70
	Caule/ramo/folha	6	60	23,3
<b>Feijão</b>	Vagem	1	4 (4,0)	
	Caule	0,4	8	54
	Folhas	1,2	40	54,0
	Raiz	0,1	2	
<b>Milho<sup>(1)</sup></b>	Grãos	6,4	0,4 (0,06)	36
	Restos culturais	-	35,6	5,6
<b>Arroz</b>	Grãos	3	2 (0,66)	
	Colmos	2	4	25
	Folhas	2	12	8,3
	Casca	1	2	
	Raiz	1	5	
<b>Trigo</b>	Grãos	3	1 (0,33)	7
	Palha	3,7	6	2,3
<b>semi-perene/perene</b>				
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	60 (0,6)	100
	Folhas	25	40	1,0
<b>Cafeeiro<sup>(1)</sup></b>	Grãos (coco)	2	7 (3,5)	
	Tronco, ramos e folhas	-	136	142
				71

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (kg t<sup>-1</sup>); Ca acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de

produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Ca da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Ca acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

Pelos resultados das diversas culturas, observa-se que a extração total de Ca variou de 7 (Trigo) até 142 kg ha<sup>-1</sup> (café). Entretanto, em valores relativos de extração de cálcio, em kg por tonelada produzida, observa-se maior exigência do cafeeiro (71 kg) e feijoeiro (54 kg) e menores das gramíneas como a cana-de-açúcar (1,0 kg) e trigo (2,3). Contudo, quando se comparam apenas culturas anuais, nota-se que as leguminosas são bem mais exigentes que as gramíneas.

Para a exportação de nutrientes por tonelada de grãos produzidos, as leguminosas (3,3 a 8,5 kg/t) exportam muito mais Ca que as gramíneas (0,06 a 0,33 kg/t). Entretanto, nota-se que, de forma geral, as quantidades exportadas pelas culturas são relativamente baixas.

### **b) Marcha de absorção**

O estudo da marcha de absorção (nutriente acumulado em função do tempo de cultivo) é importante porque permite determinar as épocas em que os elementos são mais exigidos e corrigir as deficiências que, porventura venham a ocorrer durante o desenvolvimento da cultura.

Na cultura do algodoeiro, Mendes (1965) obteve a marcha de absorção acumulativa em todo o ciclo de desenvolvimento das plantas, que durou 150 dias (Tabela 52). Observa-se absorção inicial lenta, sendo que na fase de florescimento, atingiu-se valor próximo a 50% (fase inicial) até 75% (fase final). Nota-se que até o final do florescimento, cerca de 75% do Ca exigido pela cultura já foi absorvido, indicando que este nutriente deve estar à disposição da planta logo no início do desenvolvimento, uma vez que o mesmo é fornecido na forma de calagem, aplicado em pré-semeadura (após os 3 meses que antecede a semeadura).

**Tabela 52.** Marcha de absorção (cumulativa) de cálcio do algodoeiro em solução nutritiva (Mendes, 1965).

Dias	Estádio de desenvolvimento	Ca absorvido, % do total
10		2
20		4
30	Abotoamento	13
40		27
50		44
60	Florescimento	48
70		58
80		66
90	Deiscência	75
100		79
110		86
120		87
130		88
140		96
150		100

## 8.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

### a) Deficiência

Os sintomas de deficiência de Ca ocorrem inicialmente, em regiões meristemáticas (pontos de crescimento), e nas folhas novas (Figura 75). Os sintomas mais frequentemente relatados são os seguintes:

- 1- Cor esbranquiçada nas margens de folhas;
- 2- formas irregulares de folhas, com dilaceramento das margens;
- 3- manchas necróticas internervais nas folhas;
- 4- morte de brotações a partir das pontas, podendo provocar perfilhamento das plantas;
- 5- baixa frutificação;
- 6- baixa produção de sementes;
- 7- colapso do pecíolo.

A taxa de senescência foliar pode ser alterada em plantas deficientes em Ca. A senescência é consequência da peroxidação dos lipídeos das membranas pelos níveis elevados de radicais de oxigênio livre. O efeito protetor do cálcio (e citocianinas) ocorre em função da sua ação na inibição da atividade da enzima lipoxigenase que degrada as membranas. Entretanto, durante a germinação, o Ca ativa enzimas (fosfolipases)

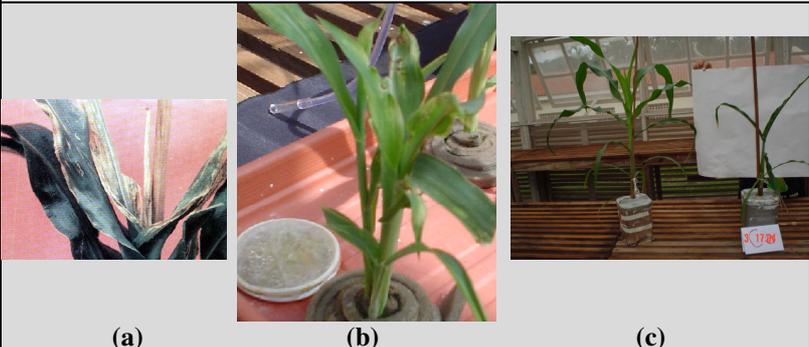
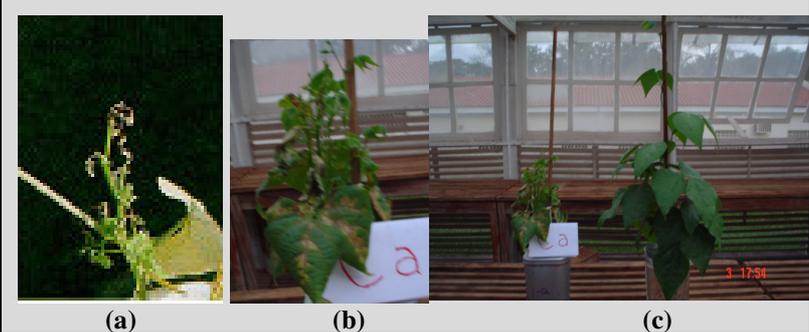
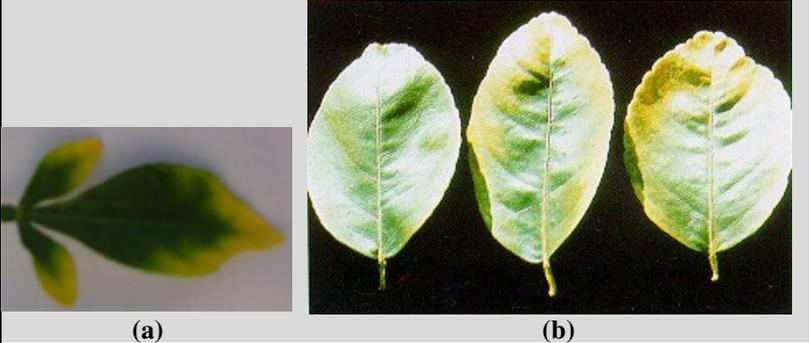
que degradam corpos lipídicos das membranas de colilédones (Paliyath & Thompson, 1987).

Plantas de *Coffea arabica* sob condições de deficiência de  $\text{Ca}^{2+}$  apresentaram redução no nível de clorofila e proteínas solúveis (Ramalho, et. al., 1995).

Normalmente os órgãos que têm alta transpiração recebem mais Ca, como a folha pela sua maior superfície específica, comparado a um fruto. Diante disso, existem algumas desordem fisiológicas, em tecidos vegetais que transpiram pouco, ou seja, recebem pouco Ca por via fluxo transpiratório, de forma que desencadeiam sintomas de deficiência de Ca. Desta forma, tem-se algumas culturas algumas anomalias, como: podridão apical do fruto do tomate e do melão, podridão-do-ápice da alface, o coração-escuro do aipo, buraco amargo da maçã e o colapso interno da manga, entre outras.

#### **b) Excessos**

Em excesso, o cálcio é altamente tolerado pelas plantas, podendo atingir nas folhas velhas cerca de 10% de Ca, sem sintomas de toxicidade. Deve-se atentar, entretanto, que o excesso de Ca poderia, eventualmente, induzir deficiência de magnésio ou de potássio, especialmente se a concentração destes estiver de média a baixa no solo.

<b>DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA</b>	<b>NUTRIENTE: CÁLCIO</b>
<b>FOTOS</b>	<b>DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS</b>
 <p>(a) (b)</p>	<p>As folhas novas enrolam-se para baixo, dando uma aparência de "gancho"; quando a deficiência é aguda, os cartuchos tornam-se necróticos nas pontas e ao longo das margens (Foto 1a); colmos tornam-se mais moles e mais finos especialmente na direção ao ponto de crescimento. E ainda a deficiência de Ca e presença de Al reduz o sistema radicular (Foto 1b).</p>
<b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b>	
 <p>(a) (b) (c)</p>	<p>As pontas das folhas mais novas em desenvolvimento gelatinizam e, quando secas, grudam umas às outras; à medida que a planta cresce, as pontas podem estar presas. Nas folhas superiores aparecem, clorose internerval (faixas largas) e necrose (foto 2a) e dilaceração das margens e ponta das folhas e morte da região de crescimento, provocando perflilhamento (foto 2b) e uma redução drástica no crescimento da planta (foto 2c).</p>
<b>Foto 2. MILHO</b>	
 <p>(a) (b) (c)</p>	<p>Morte dos pontos de crescimento (Foto 3a); murchamento de caule, pecíolo e brotos. A planta pára de emitir novas brotações. As folhas inferiores apresentam pequenas manchas acinzentadas, que posteriormente são afetadas de clorose intensa, que se inicia na base do folíolo e progride entre as nervuras, resultando em formas irregulares na porção do limbo, que se mantém verde (Foto 3b), e provoca diminuição do crescimento da planta (Foto 3c)</p>
<b>Foto 3. FEIJÃO</b>	
 <p>(a) (b)</p>	<p>Inicia-se, clorose na ponta das folhas (a). Em seguida, clorose avança ao longo das margens laterais, progredindo para dentro até alcançar a metade da distância até a nervura principal, com uma frente irregular; a planta é extremamente pequena, com sistema radicular mal desenvolvido.</p>
<b>Foto 4. CITRUS</b>	
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989).</p>	

**Figura 75.** Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Ca em diversas culturas.

## Capítulo 9 Magnésio

### 9.1 Introdução

O Mg tem sua origem primária no solo, pelas rochas ígneas e, também, rochas metamórficas e sedimentares, tendo como os principais minerais que o contêm a biotita, dolomita, clorita, serpentina e olivina. O Mg faz parte da estrutura de minerais de argila (ilita, vermiculita e montmorilonita). Entretanto, com o processo de intemperismo do solo, resta o Mg trocável, adsorvido aos colóides e componente da matéria orgânica do solo. As formas trocáveis (5-10% do teor total) e da solução do solo são consideradas disponíveis às plantas.

Em solos cultivados, com aplicações altas de fertilizantes potássicos, em culturas altamente exigentes em K (cafeeiro, algodoeiro, citros e bananeira), pode haver indução de deficiência de Mg, especialmente em solos com baixo teor do elemento. Outra situação é o uso indiscriminado de calcário calcítico, com baixo teor de magnésio (<5% MgO), podendo haver problemas de deficiência nas plantas já que nos fertilizantes convencionais este elemento não está presente.

Da mesma forma que os outros nutrientes, o incremento do valor pH do solo, próximo de 6,5, possibilita a maior disponibilidade de Mg no solo.

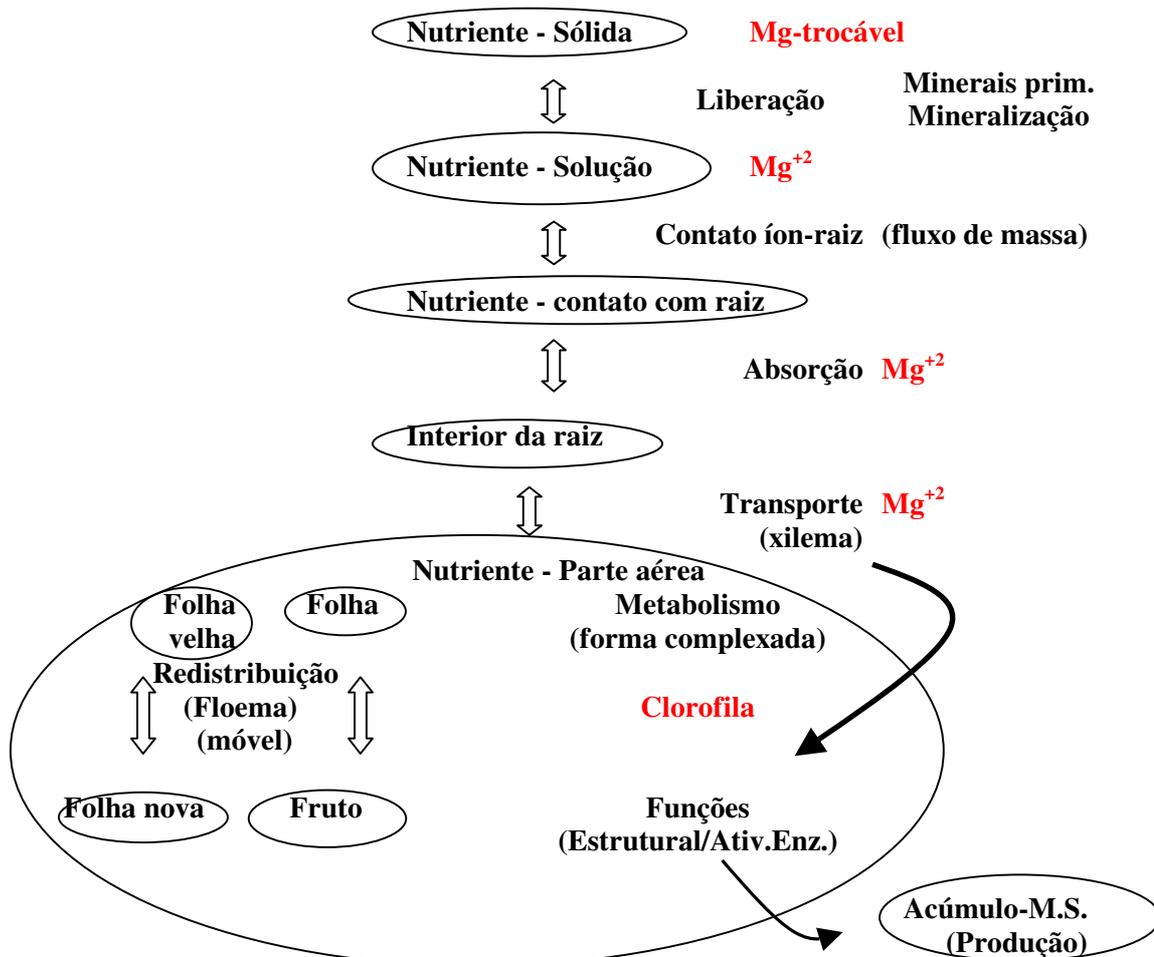
No estudo do magnésio no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo, raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até na sua incorporação em um composto orgânico ou como ativador enzimático, desempenhando funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 76).

### 9.2 Absorção, transporte e redistribuição do magnésio

#### a) Absorção

O caminamento do magnésio no solo até as raízes ocorre devido ao fluxo de massa (85% do total) (Tabela 9). Assim, este movimento é dependente da dinâmica da água no sistema solo-planta, movido pela transpiração da planta.

O processo de absorção (passiva e ativa) do magnésio na forma de  $Mg^{2+}$ , é muito estudado, pois altas concentrações de  $Ca^{2+}$ , e principalmente  $K^+$  no meio, podem inibir por competição iônica a absorção, podendo causar deficiência nas plantas (*relações Mg x Ca x K será discutido no capítulo Interação*).



**Figura 76.** Dinâmica do magnésio no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

### b) Transporte

Após a sua absorção, o  $Mg^{2+}$  é transportado (ativa e passiva), até atingir o xilema, e daí de forma passiva, para a parte aérea na corrente transpiratória.

### c) Redistribuição

Ao contrário do que ocorre com o  $Ca^{2+}$  e, de modo semelhante ao que ocorre com o  $K^+$ , o  $Mg^{2+}$  é móvel no floema. Como a maior parte do Mg da planta encontra-se na forma solúvel (Tabela 29), isso explica a sua redistribuição nas plantas.

## 9.3 Participação no metabolismo vegetal

Entre as principais funções do magnésio nas plantas, destaca-se a sua participação na constituição da clorofila, na qual o Mg corresponde a 2,7% do peso molecular e, também, como ativador enzimático

### Estrutural (clorofila) e atividade enzimática

O Mg é o átomo central da clorofila. Os cloroplastos representam cerca de 5% do volume total de uma célula de folha madura. Na deficiência de  $Mg^{2+}$  há, portanto, diminuição na síntese de clorofila e, conseqüentemente, na taxa fotossintética. Entretanto, avaliações quantitativas demonstram que a taxa fotossintética diminui mais drasticamente que o próprio teor de clorofila, acusando que a deficiência de Mg, afeta a fotossíntese em outros passos, além de sua participação na composição do pigmento. Salienta-se, também, que pequena parte do Mg acompanha o Ca na formação da parede celular.

O magnésio e o potássio são os elementos de maior expressão quanto à ativação de enzimas. Sabe-se, atualmente, que o  $Mg^{2+}$  atua como ativador enzimático das reações de regeneração da ribulose difosfato que é composto aceptor de  $CO_2$  no início do ciclo de Calvin, nos cloroplastos. Assim, o efeito do  $Mg^{2+}$  é na modulação da rubisco no estroma dos cloroplastos (Pierce, 1986). A atividade desta enzima é altamente dependente de  $Mg^{2+}$  e pH. A ligação do  $Mg^{2+}$  com a enzima aumenta tanto sua afinidade ( $K_m$ ) com o substrato  $CO_2$ , como também a velocidade máxima ( $V_{máx}$ ) da reação (Sugiyama et al., 1968). O Mg também ativa a enzima ribulose difosfato carboxilase (RuDPase) e aumenta a sua atividade com substrato  $CO_2$ , e ainda, o nutriente proporciona a manutenção do pH ótimo para a enzima. Portis Junior & Heldt (1976) verificaram que um aumento de  $Mg^{2+}$  no estroma de 3 para 5 mM seria suficiente para aumentar a afinidade da RuDPase por  $CO_2$ , tanto que a fixação deste poderia proceder-se numa taxa máxima.

Considerando o somatório de seus efeitos, pode-se entender a razão do acentuado efeito da deficiência de Mg sobre a taxa fotossintética. Como a fotossíntese é uma das principais formas de captação de energia metabólica na forma de ATP, é interessante, desde já, estabelecer-se um paralelo entre as funções do Mg e o metabolismo energético das plantas.

Nas células foliares das plantas verdes, no mínimo 25% da proteína total está localizada nos cloroplastos, constituída principalmente, da Rubisco. Isto explica porque a deficiência de  $Mg^{2+}$  afeta o tamanho, estrutura e função dos cloroplastos, incluindo a transferência de elétrons no fotossistema II (McSwain et al., 1976). Pelas suas características iônicas, o  $Mg^{2+}$  forma uma ponte entre as moléculas de ATP ou ADP e as moléculas das enzimas, possibilitando a transferência da energia de radicais fosfatos para diferentes reações de síntese orgânica. Além disso o substrato das ATPases não é apenas o ATP, mas o ATP

complexado com Mg (Mg-ATP). Portanto, deve-se observar aqui mais uma relação do  $Mg^{2+}$  com o metabolismo energético.

### Síntese protéica

O primeiro passo para a síntese de proteínas é a reação de ativação de aminoácidos. Ocorre incorporação de radicais fosfatos aos diferentes aminoácidos que passam da forma ativada (aminoacil), necessária à ligação ao RNAt, para a posterior incorporação à cadeia polipeptídica, mantendo assim, a configuração necessária para síntese protéica. O  $Mg^{2+}$  é necessário à transferência de energia aos aminoácidos, por meio de enzimas fosforilativas. Existem evidências, ainda, de que o  $Mg^{2+}$  atua na agregação das subunidades do ribossomo (Cammarano et al., 1972) que são as partículas responsáveis pela formação da cadeia polipeptídica. Outra enzima importante no metabolismo do N, a sintetase do glutamato (GS), que atua na importante via da assimilação da  $NH_3$  – GS/GOGAT, também é ativada pelo  $Mg^{2+}$  nos cloroplastos. Assim as plantas deficientes em Mg a proporção de N protéico decresce e aquele N não protéico aumenta (Haeder & Mengel, 1969).

Em resumo, as funções do Mg nas plantas estão apresentadas na Tabela 54 (Malavolta et al., 1997).

**Tabela 54.** Funções do magnésio nas plantas (Malavolta et al., 1997)

Estrutural	Ativador enzimático	Processos
Clorofila	Tioquinase acética	Absorção iônica
	Quinase pirúvica	Fotossíntese
	Hexoquinase	Respiração
	Enolase	Armazenamento/transferência de energia
	Desidrogenase isocítrica	Síntese orgânica
	Descarboxilase piruvato	Balço eletrolítico
	Carboxilase de ribulose	Estabilidade dos ribossomas
	Sintetase de fosfopiruvato	
	Sintetase de glutamilo	
	Transferase de glutamilo	

## 9.4. Exigências nutricionais das culturas

O teor total de Mg na planta pode variar de 0,15-0,35% (1,5-3,5 g  $kg^{-1}$ ). Estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores, que serão objetos de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente, e a marcha de absorção deste nutriente ao longo do cultivo.

## a) Extração e exportação de nutrientes

As culturas que mais extraíram Mg por área foram à cana-de-açúcar e o milho, 52 e 48 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, ao passo que o trigo e o arroz extraíram apenas 9 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 55).

**Tabela 55.** Exigências de magnésio das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca	Mg acumulado	Mg requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup>	
		produzida	Parte da planta		
		t ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	Total <sup>(3)</sup>	kg t <sup>-1</sup>
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/carçoço)	1,3	5 (3,8) <sup>(2)</sup>	12,7	9,8
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	7		
	Raiz	0,5	0,7		
<b>Soja<sup>(1)</sup></b>	Grãos (vagens)	3	6 (2,0)	26,0	8,7
	Caule/ramo/folha	6	20		
<b>Feijão</b>	Vagem	1	5 (5,0)	18,5	18,5
	Caule	0,4	1		
	Folhas	1,2	12		
	Raiz	0,1	0,5		
<b>Milho<sup>(1)</sup></b>	Grãos	6,4	10,0 (1,6)	48,0	7,5
	Restos culturais	-	38,0		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	4 (1,3)	9	3,0
	Colmos	2	1		
	Folhas	2	2		
	Casca	1	1		
	Raiz	1	1		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	6 (2,0)	9	3,0
	Palha	3,7	3		
<b>semiperene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	35 (0,35)	52	0,5
	Folhas	25	17		
<b>Cafeeiro<sup>(1)</sup></b>	Grãos (coco)	2	3 (1,5)	33	16,5
	Tronco, ramos e folhas	-	30		

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (kg t<sup>-1</sup>): Mg acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Mg da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Mg acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

O feijoeiro foi o que mais exportou Mg pelos grãos (5,0 kg t<sup>-1</sup>). Assim, é importante o monitoramento desta cultura para reposição periódica deste nutriente via material corretivo (calcário dolomítico), uma vez que a fonte de Mg é de menor custo.

Entre as culturas anuais, considerando a necessidade de Mg por tonelada de grão produzido, as leguminosas (8,7 a 18,5 kg/t) mostraram-se mais exigentes que as gramíneas (3 a 7,5 kg/t). Com relação à exportação de nutrientes pelos grãos produzidos pelas culturas anuais, nota-se que as leguminosas (2 a 5 kg/t) exportam mais que as gramíneas (1,3 a 2,0 kg/t).

### b) Marcha de absorção de nutrientes

Até aos 59 dias (12<sup>a</sup> folha), a absorção de Mg pelo milho foi considerada lenta, atingindo apenas 16% do total e, a partir deste período, a absorção foi acelerada com picos de velocidade alta de absorção entre 12<sup>a</sup> folha e pendoamento e na fase de grão leitoso e formação de “dente” (Tabela 56).

**Tabela 56.** Marcha de absorção (cumulativa) de magnésio da cultura do milho (Flannery, 1987).

Dias	Estádio de desenvolvimento	Mg absorvido, % do total
32	4 <sup>a</sup> folha	2
44	8 <sup>a</sup> folha	5
59	12 <sup>a</sup> folha	16
72	Pendoamento	43
84	Embonecamento	50
102	Grão leitoso	66
133	Formação de “dente”	98
146	Maturação fisiológica	100

## 9.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

### a) Deficiência

Como a maior parte do Mg da planta é móvel no floema, a deficiência aparece, inicialmente, nas folhas mais velhas, por meio de uma clorose internerval, podendo ser acompanhada com manchas amareladas que podem se unir formando faixas ao longo das margens da folha, que se tornam avermelhada ou outra pigmentação. Salienta-se que a clorose inicia com manchas que depois se juntam e espalham para as pontas e margens das folhas.

Entretanto, a sintomatologia de deficiência de Mg pode variar em função da espécie e/ou do cultivar.

Nas folhas, as células do mesófilo próximas aos feixes vasculares retêm clorofila por período mais prolongado do que células do parênquima, o que pode retardar a aparição de clorose (Epstein, 1972).

O acúmulo de carboidratos não estruturais (amido, açúcares) é tipicamente uma característica de planta deficiente de  $Mg^{2+}$ . Assim, em feijoeiro, o acúmulo de carboidratos nas folhas, está relacionado com a diminuição no teor de carboidratos nas regiões de dreno como ocorre nas raízes e vagens (Fischer & Bussler, 1988). A limitação de carboidrato fornecido para as raízes prejudica muito seu crescimento. Plantas deficientes em Mg, frequentemente mostram um atraso da fase reprodutiva (Taiz & Zeiger, 2004).

Tem-se menor translocação de carboidratos da parte aérea para a raiz, reduzindo o crescimento das raízes.

As plantas forrageiras com baixos teores de magnésio podem promover baixos teores de magnésio sérico nos animais e conseqüentemente a tetania.

#### **b) Excesso**

O fornecimento de magnésio em níveis excessivos resulta em deposição do elemento na forma de diferentes sais nos vacúolos celulares, e não são descritos na literatura, efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e produção das plantas.

DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA	NUTRIENTE: MAGNÉSIO
FOTOS	DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
	<p>Aparência mosqueada ou clorótica começando nas pontas e ao longo das margens; lesões necróticas vermelhas resultando em aparência de "ferrugem". A casca do colmo pode mostrar coloração amarronzada internamente.</p>
Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR	
	<p>As folhas mais velhas amarelecem nas margens e depois entre as nervuras dando o aspecto de estrias (Foto 2a); pode vir depois necrose das regiões cloróticas; o sintoma progride para as folhas mais novas tornando a planta inteira com folhas cloróticas (Foto 2b).</p>
Foto 2. MILHO	
	<p>As folhas mais velhas com clorose internerval que progride do centro para os bordos do folíolo e depois para as folhas mais novas. Com a progressão da deficiência surgem manchas pálidas com contorno irregular, quase esbranquiçadas, na lâmina foliar. Em seguida, as manchas escurecem na região central, ocorrendo necrose, que se propaga para a periferia da mancha.</p>
Foto 3. FEIJÃO	
	<p>A clorofila começa a desaparecer nas folhas mais velhas entre a nervura principal e a margem (Foto 2a); a progressão é usualmente para fora, deixando a figura de uma "cunha" na base da folha; pode, entretanto, dar-se para dentro e causar o aparecimento de uma cunha amarela (Foto 2b); podendo atingir a folha inteira com uma cor bronze dourada e cair prematuramente, causando morte descendente de ramos novos.</p>
Foto 4. CITRUS	
Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)	

Figura 77. Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Mg em diversas culturas.

## Capítulo 10. Boro

### 10.1 Introdução

A matéria orgânica do solo é a principal fonte de B para as plantas. Assim, solos com baixo teor de matéria orgânica e/ou baixa taxa de mineralização da matéria orgânica (umidade, temperatura, etc.) pode apresentar concentração de B no solo crítico, para a adequada nutrição da planta. Além disso, regiões com alta pluviosidade, em solos arenosos, podem promover altas taxas de lixiviação do B da solução do solo, provocando problemas de deficiência nas culturas.

Assim, é importante controlar os fatores que afetam a disponibilidade do nutriente no solo, a fim de manter a concentração de B no solo em níveis adequados às culturas. Sempre que a concentração estiver baixa ( $<0,20 \text{ mg dm}^{-3}$ ) ou até média ( $0,20-0,60 \text{ mg dm}^{-3}$ ), (extrator água quente), (Raij et al.,1996), existe potencial de resposta das plantas em geral à aplicação deste micronutriente, que pode variar em função da exigência nutricional da cultura.

No estudo do boro no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo; raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até sua incorporação em um composto orgânico ou como um ativador enzimático, que desempenhará funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 78).

### 10.2 Absorção, transporte e redistribuição do boro

#### a) Absorção

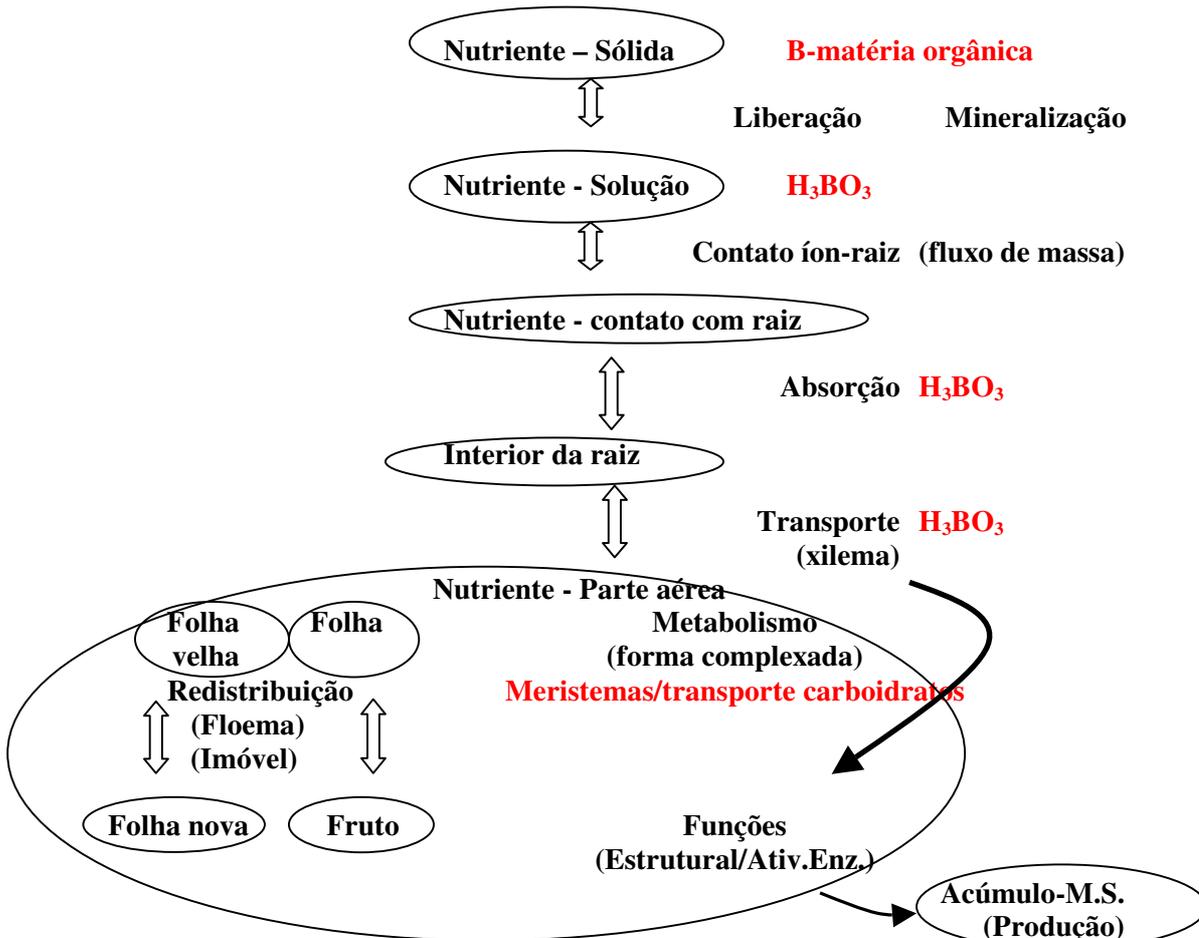
O contato B-raiz ocorre devido, basicamente, ao fluxo de massa que é afetado pela taxa transpiratória da planta. O boro é absorvido via raízes nas formas  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (preferencial) e  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$ , e, como a absorção independe da temperatura e não é afetada por inibidores da respiração, pensa-se que seja um processo passivo.

O local de aplicação do boro, também pode afetar a quantidade do nutriente absorvida. Neste sentido, Boaretto (2006), estudaram a aplicação de  $1 \text{ kg ha}^{-1}$  de B no solo e na folha de citrus em produção. Verificaram que a quantidade absorvida foi de 65 e  $17 \text{ g ha}^{-1}$  de B, para aplicação no solo e na folha,

respectivamente. Assim, concluiu-se que a eficiência de absorção do B pelas raízes é cerca de 3,5 vezes superior que a eficiência de absorção pelas folhas.

### b) Transporte

Uma vez absorvido, o boro na forma  $H_3BO_3$ , tem transporte unidirecional, por meio da corrente transpiratória.



**Figura 78.** Dinâmica do boro no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

### c) Redistribuição

O boro praticamente não é redistribuído nas plantas em geral, uma vez que imóvel no floema. Esta redistribuição muito limitada de B na maioria das culturas, tem as seguintes implicações práticas:

a) O aparecimento dos sintomas de deficiências ocorre nas folhas mais novas ou regiões de crescimento;

- b) a planta necessita de um suprimento contínuo para viver;
- c) a aplicação de B, para suprir a planta, deve ser feita no solo para atingir o sistema radicular da planta e, conseqüentemente, absorção e transporte para parte aérea.

Entretanto, pesquisas recentes têm indicado que o B pode ser móvel em certas plantas que produzem polióis (açúcar simples – metabólito fotossintético primário) que ligam com o B, tornando o complexo “Açúcar-B” móvel na planta (Brown & Hu, 1998). Assim, as plantas que não apresenta no floema estes açúcares polióis e sim sacarose, não tem o boro móvel no floema. Segundo Marschner (1997) a sacarose, por não ter ligações cis-diol, não forma complexo estáveis com o B. Portanto, algumas plantas apresentam os poliois na seiva do floema das espécies do gênero *Pyrus*, *Malus* e *Prunus* por Hu & Brown (1996) e Hu et al. (1997), resultando em mobilidade do B nas plantas. Outras espécies o B foi também considerado móvel (macieira, ameixeira, cerejeira) (Brown e Hu, 1998); (brócolis) (Shelp, 1988).

O estado nutricional pode afetar a mobilidade do boro. Boaretto (2006) verificou que em mudas de citrus a redistribuição de B foi próxima a 20% em plantas deficientes e em plantas com teor adequado do nutriente a redistribuição foi dobro (ou seja cerca de 40%).

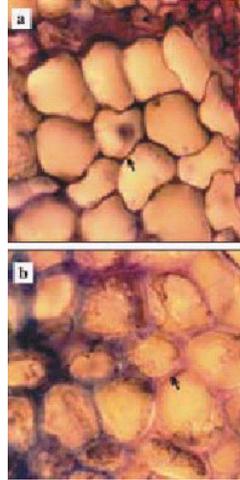
### 10.3 Participação no metabolismo vegetal

O boro é o único nutriente que teve sua essencialidade determinada pelo método indireto (Marschner, 1997). Entretanto, atualmente é aceito que o B também, satisfaz o critério direto, pois é ativador de várias enzimas e atua como constituinte da parede celular. Deste modo, o boro desempenha vários papéis na vida das plantas:

#### a) Síntese da parede celular e alongamento celular

A deficiência de boro promove alteração na síntese dos compostos que compõem a parede celular (pectina, hemicelulose e precursores da lignina), (metabolismo de carboidratos); é encontrado em complexos de ésteres cis-borato. Assim, nas plantas com deficiência de B, há irregularidades na deposição das substâncias cimentante nas células do câmbio, podendo causar colapso do caule das plantas, como da seringueira (Figura 79), (Moraes et al., 2002).

Assim o B atua na biossíntese da parede celular auxiliando o Ca na deposição e formação de pectatos que fará parte dessas estruturas. Cabe salientar que as plantas que apresentam maior exigência em B são aquelas que contêm maior conteúdo de B complexado na parede celular.

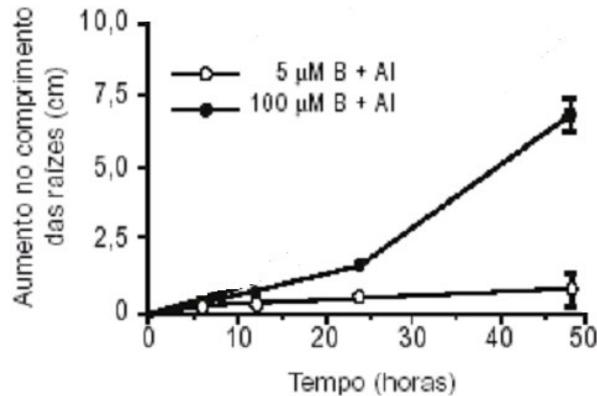


**Figura 79.** Células do câmbio de plantas de seringueira sem boro, indicando células descoladas sem a presença de constituintes da lamela média (a) e com boro, indicando células com a presença de constituintes da lamela média (b) (Moraes et al., 2002).

Um aspecto geral da deficiência ocorre, inicialmente com reduzido desenvolvimento (alongamento) dos tecidos meristemáticos (extremidades da raiz e ramos) e, em seguida, tornam-se desorganizados e os tecidos morrem. No entanto, Cohen & Lepper (1977) consideraram que a cessação do alongamento de raízes de abóbora, submetidas à omissão de boro, foi causada pela falta de divisão das células meristemáticas e não por falta de alongamento celular, sugerindo que esse micronutriente age como um regulador da divisão celular. Acredita-se que o B influencie os processos de divisão celular, alterando o nível do AIA, através da ativação de enzimas que oxidam esse hormônio.

O B participa da síntese da base nitrogenada uracil e com esta é componente do RNA, tem-se queda na síntese do RNA e conseqüentemente a síntese protéica. Como a síntese de RNA, ribose e proteína são os processos mais importantes nos tecidos meristemáticos, a divisão e diferenciação celular é seriamente prejudicada e, portanto o crescimento das partes jovens das plantas é afetado (Mengel & Kirkby, 1982). Experimento indica que o crescimento radicular pode ser paralisado após 48 horas de omissão de B (Amberger, 1988). O alongamento da planta é também prejudicado pelo fato que o B tem efeito direto na formação de vasos xilemáticos (crescimento e diferenciação).

Em leguminosas, a falta do B deve afetar a síntese da parede celular dos nódulos presentes nas raízes, permitindo o fluxo de O<sub>2</sub>, resultando na redução da fixação biológica do N (Blevins & Lukaszewski, 1998). Cabe ressaltar que concentrações de B acima do normal protegem o crescimento radicular em situações em que altos teores de Al normalmente seriam inibidores (Figura 80), (Lenoble et al., 2000).



**Figura 80.** Altas concentrações de B no meio de crescimento na presença de altas concentrações de Al aumentaram significativamente o crescimento de raiz da aboboreira, sob hidroponia (Lenoble et al., 2000).

Ruiz et al. (2006) observaram que a toxidez de Al pode ser minimizado pelo efeito do B nas enzimas relacionadas ao metabolismo da Glutathione (GSH) que é considerado mecanismo importante das plantas em aliviar estresse do ambiente. Assim, o B, estimula a biossíntese do GSH nas folhas e estas são transportadas para as raízes, reduzindo a ação do oxigênio ativo, normalmente produzido pela toxidez de Al.

#### b) Integridade da membrana

Os efeitos do B restringem-se apenas sobre a plasmalema e não no tonoplasto, formando complexos cis-diol-borato, constituintes da plasmalema. A deficiência de B reduz a absorção de K e P e a atividade da ATPase da plasmalema e da RNAase o teor de fosfolipídeos e galactolipídeos, provocando diminuição do teor de proteínas nas membranas, com danos na formação e estabilidade da plasmalema, diminuindo o funcionamento dos canais protéicos, com aumento do efluxo de solutos. Além disso, em plantas deficientes em B, acumula-se compostos fenólicos, que leva a produção dos radicais livres, que causam peroxidação de lipídeos afetando a integridade das membranas.

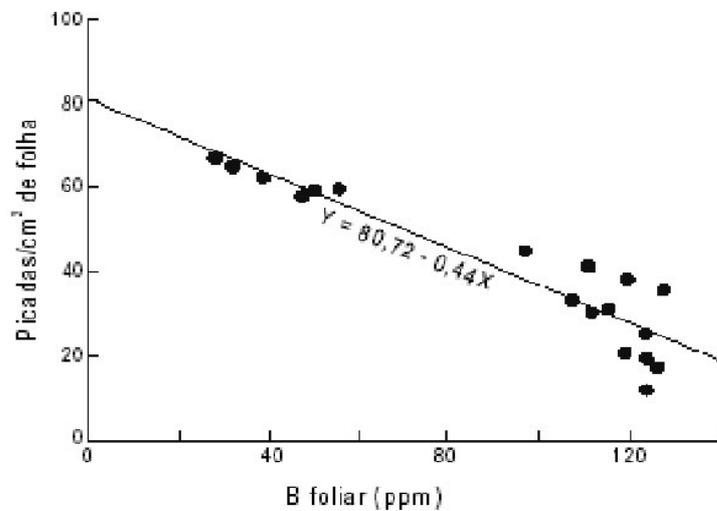
Assim, existem pesquisas indicando correlação linear negativa entre o aumento das doses de B e a incidência de pragas (Figura 81). Isto é explicado pelo fato de que plantas deficientes em B apresentarem

plasmalema com maior efluxo de aminoácidos livres, que poderão servir de alimento para eventuais parasitas, ao passo que plantas com adequado teor de B, apresentam maior integridade da plasmalema, menos alimento disponível e menor infestação de pragas.

### c) Transporte de carboidratos

O B facilita o transporte de açúcares, uma vez que combina com o carboidrato, dando um complexo borato-açúcar ionizável, mais solúvel às membranas (Gauch & Dugger Jr., 1953). O B tem efeito positivo na manutenção da estrutura e funcionamento dos vasos condutores. Sob condições de deficiência de B, ocorre redução no transporte da sacarose das folhas para outras partes da planta, pela maior produção de calose (polissacarídeo semelhante à celulose), a qual provoca a obstrução do floema, principal via de transporte da sacarose (Loué, 1993).

Cabe ressaltar que o teor de B adequado nas plantas induz maior excreção de açúcares, facilitando o processo de micorrização.



**Figura 81.** Relação do B foliar e a intensidade de ataque do ácaro vermelho em mudas de dedeneiro, 20 dias após a infestação (Rajaratnam & Hock, 1975)

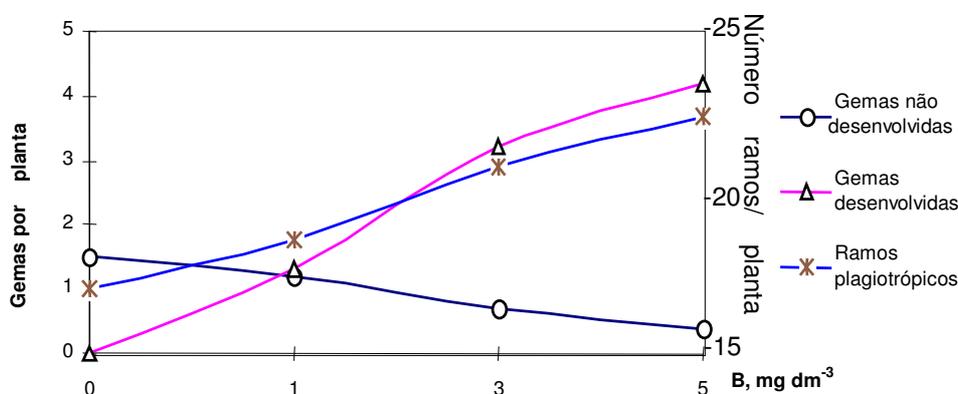
### d) Crescimento reprodutivo

O processo de germinação do grão de pólen e desenvolvimento do tubo polínico é muito dependente do B para promover a deposição da parede celular, e não o alongamento da mesma. O nível crítico de B para

germinação do grão de pólen varia de  $3 \mu\text{g}^{-1}$  (milho) até  $50\text{-}60 \mu\text{g}^{-1}$  (videira). No tubo polínico, o B é requerido para inativar a calose, formando-se complexos de B-calose; caso contrário, tem-se a síntese de fitoalexinas (fenóis) inibindo o crescimento do tubo polínico. Assim, muitas vezes a exigência de B pelas plantas no período reprodutivo é mais crítica que no período vegetativo.

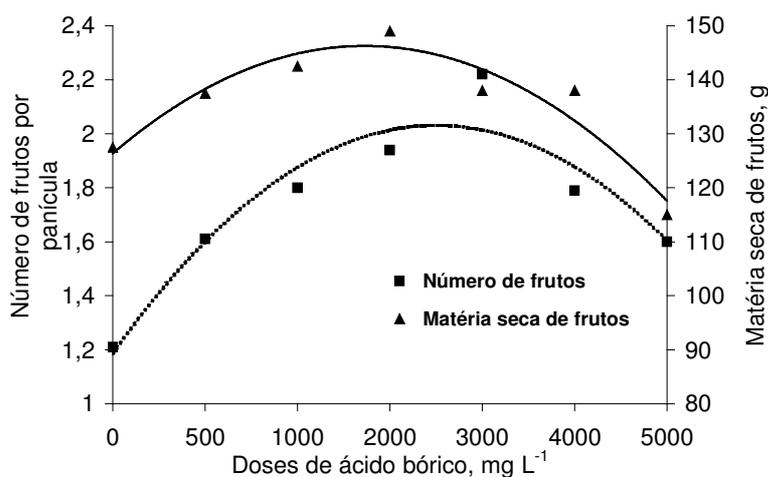
Em *Petunia*, o tubo polínico segue o gradiente natural de B, a partir do estigma, através do estilo até o avário, indicando que ele pode atuar como um agente quimiostático (Bleviss & Lukaszewski, 1998).

Lima Filho (1991) verificou em cafeeiro que o suprimento de boro aumentou o número de gemas viáveis e o de ramos plagiotrópicos, reduzindo o número de gemas não-desenvolvidas (Figura 82).



**Figura 82.** Relação entre o boro adicionado e colheita potencial do catuaí (Lima Filho, 1991).

Em mangueira, o boro também tem efeito positivo na parte reprodutiva, aumentando o número de frutos por panícula, além da matéria seca dos frutos (Figura 83), (Singh & Dhillon, 1987).



**Figura 83.** Efeito do boro (via foliar) no número de frutos por panícula e na matéria seca de frutos (Singh & Dhillon, 1987).

Silva et al. (1995) observaram em algodoeiro, uma relação positiva entre o teor foliar de B e a produção (Figura 84). Ressalta-se que o algodoeiro é uma das culturas mais responsivas a aplicação de B.

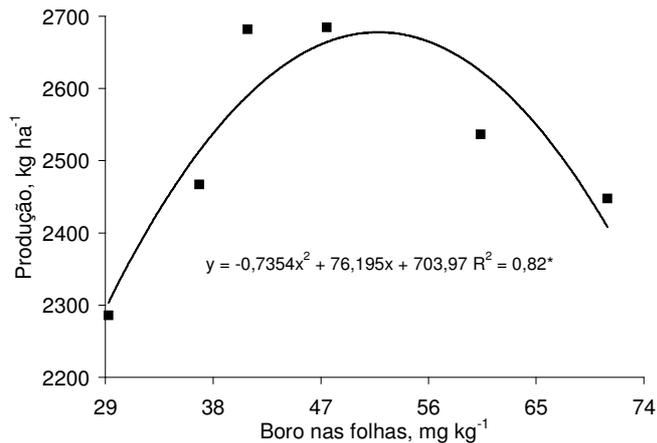
Existem ainda, outros efeitos do B, como no metabolismo do ascorbato. Uma vez que o mesmo, estimula atividade de uma enzima (NADH oxidase) que atua na produção do ascorbato. Além disso, o B participa do metabolismo das auxinas, mas os resultados são contraditórios. Por exemplo: altos níveis de AIA somente estão associados à deficiência de B em plantas em que a escassez deste elemento estimula a produção de certos compostos fenólicos (ácido caféico), inibidor da oxidase do AIA; em caso contrário, essa deficiência diminui o nível de AIA (Marschener, 1995).

O boro pode afetar a fixação biológica do N. A presença de oxigênio pode inibir completamente a atividade da nitrogenase. Assim, na fixação biológica do N<sub>2</sub>, um mecanismo fisiológico determina a quantidade de oxigênio, responsável pelo processo de respiração celular, sem, no entanto, comprometer a atividade da enzima. Esse mecanismo pode estar ligado à atuação do B na parede celular, cuja importância reside na relação entre a membrana da leguminosa e do rizóbio (Bolaños et al., 1996). Segundo Cakmak & Römheld (1997), o B, ao interagir com grupos OH dos glicopeptídeos na camada de polissacarídeos do envelope, protetor da nitrogenase, contribui para o fortalecimento da barreira em relação à difusão do O<sub>2</sub>.

#### 10.4. Exigências nutricionais das culturas

O B e o Zn constituem os micronutrientes que mais limitam a produção das culturas no Brasil.

A concentração de boro nos tecidos das monocotiledôneas varia de 6 a 18 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto nas dicotiledôneas, varia de 20 a 60 mg kg<sup>-1</sup>. Assim, a deficiência no grupo das monocotiledôneas apresenta menor incidência no campo. O algodoeiro, as brássicas, o girassol, a soja, o amendoim e a alfafa são, em geral, mais suscetíveis a deficiências de boro que gramíneas. Soma-se, a estas as plantas que formam raízes tuberosas (cenoura, beterraba, batata) e produtoras de látex (euforbiáceas) (Marschner, 1995). Portanto, existe relação direta do teor de B nas folhas e produção das culturas, a exemplo do algodoeiro (Figura 84).



**Figura 84.** Relação entre o teor de B nas folhas e a produção do algodoeiro, em solo intensamente cultivado e corrigido (média de seis anos) (Adaptado de Silva et al., 1995).

A Tabela 57 indica a extração total de boro por diversas culturas, mas como as quantidades são relativamente pequenas, algumas informações não foram determinadas.

Pela extração total por área, a cana-de-açúcar e o algodoeiro, são os que mais extraem: 300 e 165 g ha<sup>-1</sup>. Entretanto, o algodoeiro, foi o que mais extraiu B para cada tonelada produzida (130 g t<sup>-1</sup>); indicando que esta cultura tem alta exigência de B. Por outro lado, o trigo foi à cultura que mais exportou B com a colheita (133 g t<sup>-1</sup>), portanto, a reposição deste elemento químico em área cultivada com esta cultura é importante.

Normalmente as exigências das culturas são distintas pelo fato da habilidade das plantas em acumular boro nas paredes celulares. Neste sentido, Hu et al. (1996) estudando quatorze espécies estudadas, observaram que há correlação significativa entre espécies exigentes em B e o nível de pectina da parede de celular. Os autores complementam, que em geral, mais B é requerido pelas dicotiledôneas comparado as monocotiledôneas, presumivelmente por causa do conteúdo de pectina mais alto no primeiro grupo de plantas.

Salienta-se ainda, que esta habilidade das plantas em reter B na parede celular, pode até dificultar o conhecimento do estado nutricional das plantas. Neste sentido, Boaretto et al. (1997) alertam que muitas vezes a não correlação entre os teores de B nas folhas e a produtividade pode ser explicada pela dificuldade em se remover o boro retido na cutícula foliar ou o ligado na camada pectínica da parede celular, sem concretizar sua função metabólica, superestimando, assim, o nível de B foliar.

**Tabela 57.** Exigências de boro de algumas culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca	B acumulado		B requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup>
		produzida	Parte da planta	Total <sup>(3)</sup>	
		t ha <sup>-1</sup>	g ha <sup>-1</sup>		g t <sup>-1</sup>
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	43 (33) <sup>(2)</sup>		130
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	117		
	Raiz	0,5	5		
<b>Soja</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (vagens)	3	-	100	33
	Caule/ramo/folha	6	-		
<b>Milho</b> <sup>(1)</sup>	Grãos	6,4	20 (3,1)		12,5
	Restos culturais	-	60		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	6 (2,0)		35,6
	Colmos	2	24		
	Folhas	2	34		
	Casca	1	13		
	Raiz	1	30		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	400 (133)		-
	Palha	3,7	-		
<b>semiperene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	200 (2,0)		3,0
	Folhas	25	100		

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (kg t<sup>-1</sup>): B acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de B da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: B acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

Normalmente as exigências das culturas são distintas pelo fato da habilidade das plantas em acumular boro nas paredes celulares. Neste sentido, Hu et al. (1996) estudando quatorze espécies estudadas, observaram que há correlação significativa entre espécies exigentes em B e o nível de pectina da parede de celular. Os autores complementam, que em geral, mais B é requerido pelas dicotiledôneas comparado as monocotiledôneas, presumivelmente por causa do conteúdo de pectina mais alto no primeiro grupo de plantas.

Salienta-se ainda, que esta habilidade das plantas em reter B na parede celular, pode até dificultar o conhecimento do estado nutricional das plantas. Neste sentido, Boaretto et al. (1997) alertam que muitas vezes a não correlação entre os teores de B nas folhas e a produtividade pode ser explicada pela dificuldade

em se remover o boro retido na cutícula foliar ou o ligado na camada péctica da parede celular, sem concretizar sua função metabólica, superestimando, assim, o nível de B foliar.

### b) Marcha de absorção de nutrientes

Nota-se que a absorção de boro na soja é relativamente lenta nos primeiros 30 dias (0,2 g/ha/dia); a partir deste período, a velocidade de absorção é alta, atingindo o máximo aos 60-90 dias (1,8 g/ha/dia) e a partir deste ponto, tem-se decréscimo acentuado na velocidade absorção do B, que compreende o período 90-120 dias (Tabela 58).

**Tabela 58.** Marcha de absorção (cumulativa) de boro em soja, cultivada em solução nutritiva (Bataglia & Mascarenhas, 1977)

Período (dias após a semeadura)	B absorvido, g/ha/dia
0-30	0,2
30-60	1,0
60-90	1,8
90-120	0,6

## 10.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

### a) Deficiência

Como o B é imóvel no floema, os sintomas de deficiência ocorrem nos órgãos novos, folhas ou raízes (Figura 85). Os papéis do B na vida das plantas ajudam explicar sintomas de deficiências:

\_ principal sintoma é a inibição do crescimento da parte aérea e das raízes e até morte das gemas terminais (podendo estimular brotações laterais);

\_ encurtamento dos internódios, folhas/frutos pequenas e deformadas;

\_ folhas engrossadas (acúmulo de carboidratos) duras e até quebradiças;

\_ pequena produção de sementes;

\_ folhas necrosadas: acúmulo excessivo de fenóis e de AIA (inibição da AIA oxidase) (Coke & Whittington, 1968).

\_ caule fica enrugado, rachado; muitas vezes, com manchas ou estrias de cortiça.

\_ em frutos podem acumular substâncias em bolsas de goma no albedo, visto que há redução na condução de açúcares para as raízes.

\_ A presença de nervuras salientes, isto pode ser devido ao aumento da lignina. Em plantas deficientes em B, há uma menor complexação dos íons borato com fenóis, particularmente ácido caféico, aumentando a produção dos alcoóis fenólicos, que fazem parte da estrutura da lignina (Pilbeam & Kirkby, 1983).

Salienta-se que as plantas deficientes em B, podem afetar a absorção e translocação do Ca e K (Ramon et al., 1990).

<p><b>DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA</b></p>	<p><b>NUTRIENTE: BORO</b></p>
<p><b>FOTOS</b></p>	<p><b>DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS</b></p>
	<p>As espigas ficam mau formadas com falhas nas fileiras e com os grãos deformados. baixa polinização; quando as espigas se desenvolvem podem mostrar faixas marrons de cortiça na base dos grãos.</p>
<p><b>Foto 1. MILHO</b></p>	
 <p>(a) (b) (c)</p>	<p>Faixas alongadas aquosas ou transparentes (foto 2a) que depois ficam brancas ou secas nas folhas novas (foto 2b); o ponto de crescimento morre (foto 2c).</p>
<p><b>Foto 2. MILHO</b></p>	
 <p>(a) (b) (c) (d)</p>	<p>As plantas podem apresentar ponteiros cloróticos e folhas novas distorcidas e enrugadas, superbrotadas e com baixa produção (foto 3a), podendo levar a morte da parte apical da planta. Os botões florais são menores deformados e atrofiados (foto 3b), provocando queda das flores e até frutos novos. Os frutos são menores, apresentando mancha escurecida interna em sua base (foto 3c). Os pecíolos das folhas podem ficar mais curtos, espessos e com anéis escuros (foto 3d).</p>
<p><b>Foto 3. ALGODÃO</b></p>	
	<p>As folhas são pequenas, tem formas bizarras. Em casos severos as gemas terminais podem secar ou morrer e a ponta do galho também o faz; Há superbrotamento. Os internódios encurtam. O pegamento da florada é menor. As raízes se desenvolvem menos.</p>
<p><b>Foto 4. CAFÉ</b></p>	
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>	

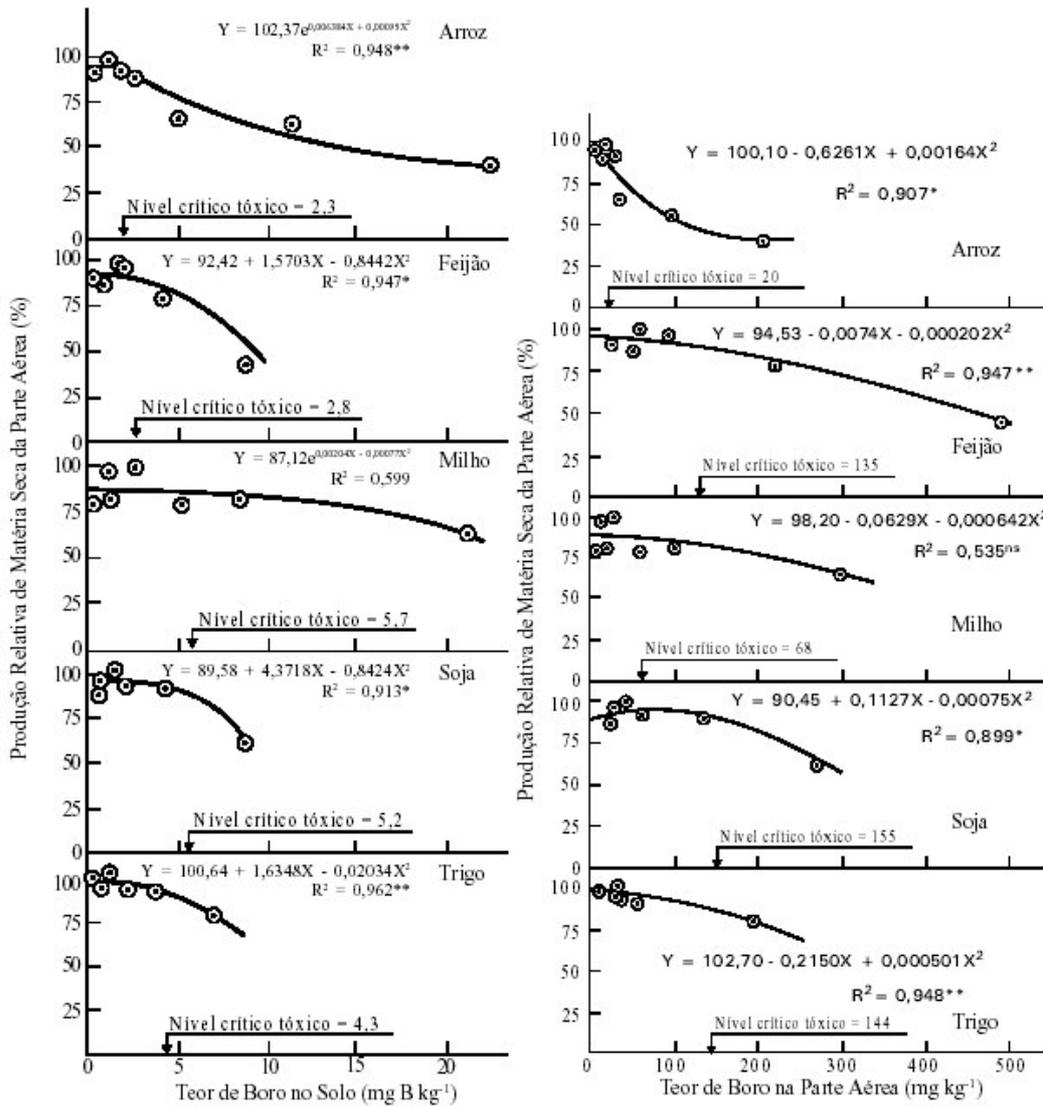
**Figura 85.** Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de B em diversas culturas.

**b) Excessos**

Na literatura, é comum encontrar relatos do limite pequeno entre a dose adequada e a tóxica; portanto, os riscos de toxidez são aumentados no campo, especialmente a aplicação do dado nutriente em solos arenosos. Entretanto, o sintoma de toxidez pode ocorrer com teor alto do elemento, dependendo da espécie.

Normalmente, os sintomas caracterizam-se como clorose malhada ( $200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e depois manchas necróticas ( $>1500 \text{ mg kg}^{-1}$ ) nos bordos das folhas mais velhas (regiões de acúmulo de B), devido à maior taxa de transpiração nestes locais. Os níveis críticos de toxidez pode variar com a espécie de  $100 \text{ mg B kg}^{-1}$  no milho a  $1000 \text{ mg B kg}^{-1}$  na abóbora (Marschner, 1995) e  $444 \text{ mg B kg}^{-1}$  em folhas (velhas) de citrus cv. “Navelina” (Papadakis et al., 2004).

Fageria (2000b) avaliou em diversas culturas anuais os efeitos do B no solo e na parte aérea (Figura 86), confirmando que a faixa de doses adequadas e tóxicas são próximas,  $0,4-4,7$  e  $3-8,7 \text{ mg B kg}^{-1}$ , respectivamente. Os níveis tóxicos de B na parte aérea estão entre  $20$  a  $153 \text{ mg B kg}^{-1}$ , para as cinco culturas avaliadas.



**Figura 86.** Relação entre teor de boro no solo e na parte aérea da planta e a produção relativa de matéria seca da parte aérea de arroz, feijão, milho, soja e trigo (Fageria, 2000b).

## Capítulo 11. Zinco

### 11.1 Introdução

O Zn é um micronutriente limitante para a maioria das culturas. Isto se deve à sua baixa concentração no solo, pois, muitas vezes está adsorvido a argilas, como a goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  hidratado), representando 30-60% do total e, outra parte, está “presa” à matéria orgânica. Na solução do solo, a maior parte do zinco está na forma de complexos orgânicos solúveis. Além do problema da baixa concentração do Zn no solo, a sua disponibilidade é muito influenciada por diversos fatores. O mais importante é o valor pH do solo, sendo que quanto mais alto, menor será a sua disponibilidade na solução do solo, especialmente em solos arenosos que receberam altas doses de calcário. Além do pH, altas doses de fertilizantes fosfatados podem induzir problemas de deficiência de Zn. Solos com alto teor de matéria orgânica podem “fixar” o Zn ou a microbiota pode imobilizá-lo temporariamente; além disso, solos com alta umidade, associados à baixa temperatura, também podem diminuir temporariamente a sua disponibilidade. Assim, o conhecimento destes fatores que governam a disponibilidade do Zn no solo são importantes, uma vez que afetam a absorção e a nutrição das plantas.

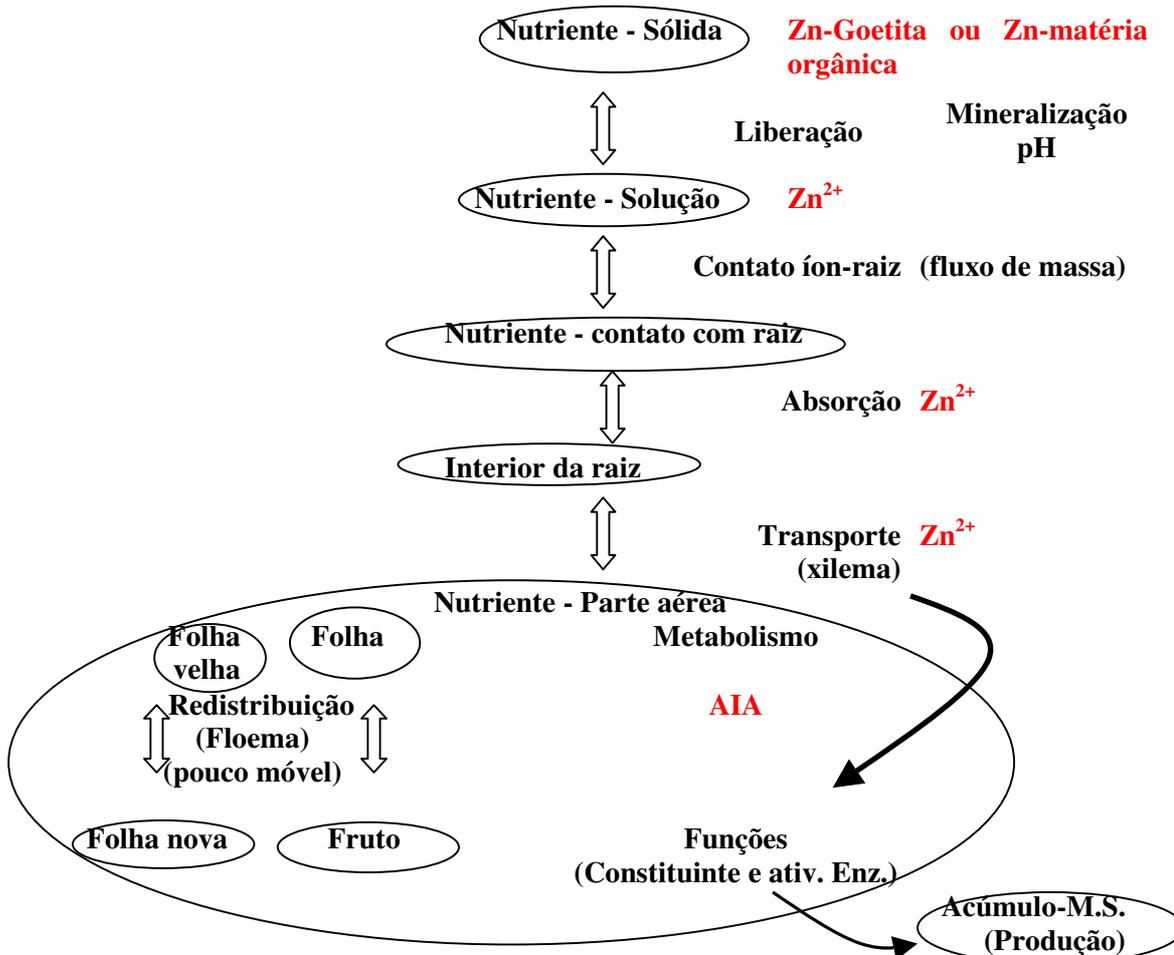
É importante controlar os fatores que afetam a disponibilidade do nutriente no solo, a fim de manter a concentração de Zn em níveis adequados às culturas. Sempre que a concentração estiver baixa ( $<0,7 \text{ mg dm}^{-3}$ ) ou até média ( $0,7-1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), (extrator DTPA), (Raij et al., 1996), existe potencial de resposta das plantas em geral à aplicação deste micronutriente, variando em função da exigência nutricional da cultura.

No estudo do zinco, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre no sistema solo e planta. Sendo, este último fator importante para o conhecimento do seu papel na fisiologia da planta e na formação das colheitas (Figura 87).

### 11.2 Absorção, transporte e redistribuição do zinco

#### a) Absorção

O contato Zn-raiz, é explicado especialmente pela difusão que depende do gradiente de concentração próximo da raiz (Oliver & Barber, 1966). O zinco é absorvido pelas raízes na forma de  $\text{Zn}^{2+}$ , de forma ativa. Entretanto, em valor pH alto, pode ser absorvido na forma monovalente  $\text{ZnOH}^+$ . Outros nutrientes em altas concentrações no meio podem inibir competitivamente a absorção do Zn.



**Figura 87.** Dinâmica do zinco no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

**b) Transporte**

O zinco na mesma forma que a absorvida  $Zn^{2+}$  sofre o transporte radial, de forma passiva e ativa. Em seguida, tem-se o transporte à longa distância, das raízes para a parte aérea pelo xilema.

**c) Redistribuição**

Devido à baixa estabilidade por quelantes orgânicos, o zinco praticamente não é encontrado no floema, razão pela qual sua redistribuição na planta é muito limitada, se considerado, assim, pouco móvel. Entretanto, em plantas bem supridas com Zn, a mobilidade do elemento no floema pode ser aumentada.

**11.3 Participação no metabolismo vegetal**

O zinco não apresenta função estrutural definida. É, porém, ativador de várias enzimas, embora possa fazer parte da constituição de algumas delas. Salienta-se, que o zinco na planta ( $Zn^{2+}$ ), não é oxidado e

nem reduzido (ou seja não está sujeito mudanças de valências), diferentemente dos demais micronutrientes e sim tem tendência em formar complexos tetraédricos.

As funções mais conhecidas do zinco são:

#### a) Síntese do Ácido indolacético (AIA)

A literatura indica que a deficiência de Zn pode degradar o AIA existente na planta (aumento da atividade AIA oxidase) ou reduzir a sua síntese. No caso da síntese de AIA, embora haja discussão, mas é comum indicar que o Zn é requerido para a síntese do aminoácido triptofano, um precursor da biossíntese do AIA. A enzima sintetase do triptofano exige Zn para a sua atividade, tendo-se a seguinte reação:



Normalmente, a deficiência de Zn resulta em diminuição do volume celular e menor crescimento apical, devido ao distúrbio no metabolismo das auxinas como AIA (redução da síntese ou a própria degradação). Salienta-se, portanto, que o Zn é mais importante para manutenção da auxina em seu estado ativo, comparado a sua síntese (Skoog, 1940). Assim, em plantas submetidas a deficiência de Zn, tem-se queda drástica da concentração de auxina, mesmo antes do aparecimento dos sintomas visuais.

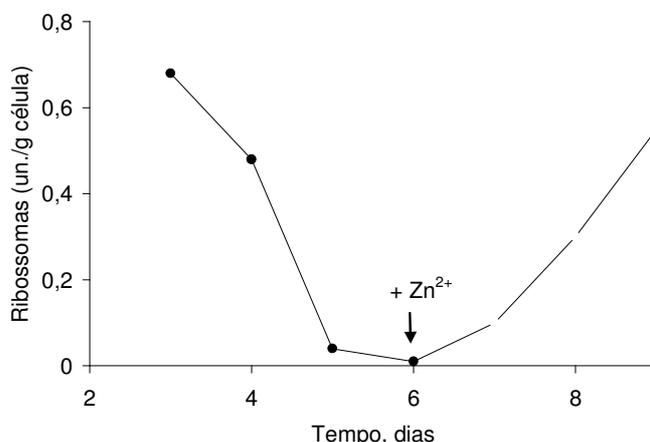
#### b) Síntese protéica (RNA) e redução de nitrato

Outro fator que pode inibir o crescimento é que plantas deficientes em Zn mostram grande diminuição no nível de RNA, o que resulta menor síntese de proteínas e dificuldade na divisão celular; isto é explicado pelo fato do nutriente inibir a RNAase (desintegradora de RNA), e ainda faz parte da RNA polimerase, que sintetiza RNA. O Zn faz parte de ribossomas (local da síntese protéica) e sua deficiência leva à desintegração; entretanto, com a sua reposição, o processo se inverte (Figura 88).

Assim, em plantas deficientes em Zn, tem-se, em geral, acúmulo de aminoácidos, diminuição da síntese de proteínas associadas à diminuição do AIA, decrescendo, assim, a produção de matéria seca (Tabela 59). Salienta-se, ainda, que existem indicações que o papel principal do Zn não é na síntese do

triptofano, visto nas plantas deficientes em Zn apresentaram altas concentração do triptofano (Tabela 59). Assim, o papel do Zn seria no caminho metabólico de triptofano até a auxina.

O Zn também está ligado ao metabolismo do N nas plantas supridas com nitrato e sua deficiência leva ao acúmulo de N-NO<sub>3</sub>, podendo reduzir a síntese de aminoácidos.



**Figura 88.** Efeito da omissão (por seis dias) e reaplicação de Zn, no número de ribossomas em Euglena (Prak & Plocke, 1971, citado por Marschner, 1986).

**Tabela 59.** Efeito do zinco na produção de matéria seca do feijoeiro e no conteúdo de componentes orgânicos na parte apical da planta <sup>a</sup>

Zn aplicado	Matéria seca		Parte apical da planta (folhas + ramos)				
			Zn	Aminoácidos	Proteína	Triptofano	IAA
	g por plantas	3 μ g <sup>-1</sup> matéria seca	μ Mol matéria seca	mg g <sup>-1</sup> matéria fresca	μ Mol matéria seca	ng g <sup>-1</sup> matéria fresca	
+Zn (1μM)	8,2	52	82	28	0,37	239	
- Zn	3,7	13	533	14	1,32	118	
-Zn + Zn <sup>b</sup>	4,5	141	118	30	0,27	198	

<sup>a</sup> Fonte Cakmak et al. (1989); <sup>b</sup> supriu-se Zn por três dias (3μM)

**c) Estrutura de enzimas e atividade enzimática**

O Zn, juntamente com o Cu, faz parte da estrutura da enzima dismutase de superóxido e de outras. A manutenção da atividade da dismutase de superóxido é importante, porque decompõem radicais oxidantes (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) produzidos a partir do oxigênio, protegendo a célula de seu efeito prejudicial (degradação do AIA, oxidação de lipídeos), que pode afetar a integridade das membranas. E ainda, pode ser produzido peróxido de hidrogênio a qual pode ser destoxificado pela catalase, ativada pelo Zn. O Zn participa também da composição da enzima polimerase de RNA. Além da enzima álcool desidrogenase que catalisa a redução de acetaldeído a etanol.

Por fim, o Zn, atua na atividade enzimática, seja para acomodar ligação enzima/substrato ou no efeito da conformação das moléculas. Assim, o Zn ativa enzimas importantes como a anidrase carbônica, ribulose 1,5-difosfato carboxilase (presente nos cloroplastos) e, portanto, afeta significativamente a taxa fotossintética das plantas. Além disso, o Zn pode, ter alguma participação na formação da clorofila, afetando também a fotossíntese.

A deficiência de Zn, promove a perda da integridade das membranas pelo nível elevado de radicais livres de O<sub>2</sub> (baixa atividade da dismutase) e pela desestabilização estrutural de proteínas devido à quebra das ligações do Zn com os grupos sulfidrilos (-SH). Este fato, contribui para aumentar a susceptibilidade da planta às doenças e a redistribuição de P da parte aérea para as raízes fica inibida.

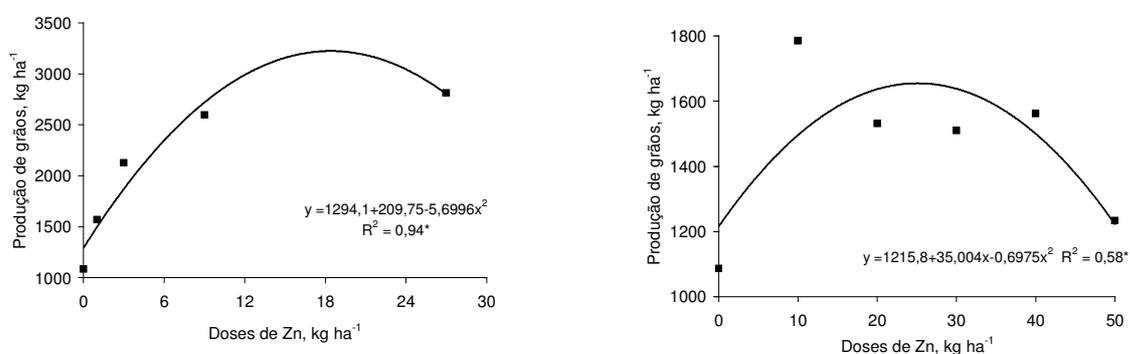
Malavolta et al. (1997) apresentam um resumo das funções do Zn nas plantas (Tabela 60).

**Tabela 60.** Funções do zinco nas plantas (Malavolta et al.,1997)

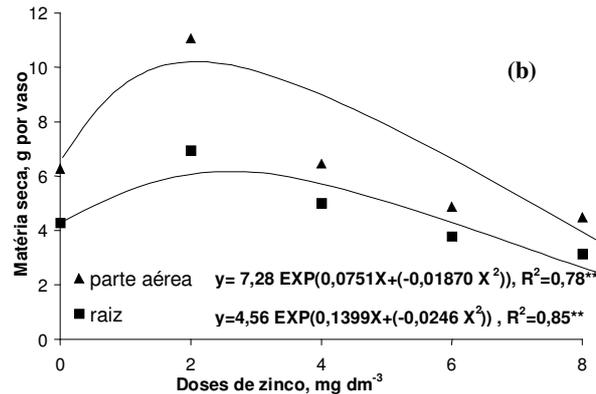
Constituinte enzimático	Processos
Anidrase carbônica	Controle hormonal (AIA)
Isomerase de fosfomanose	Síntese de proteínas
Desidrogenase láctica	
Desidrogenase alcoólica	
Aldolase	
Desidrogenase glutâmica	
Carboxilase pirúvica	
Sintetase do triptofano	
Ribonuclease	

Na literatura, tem sido verificado o efeito positivo do Zn na produção de culturas anuais como a soja, por meio do efeito residual (Ritchey, 1978) e também no arroz (Pereira & Vieira, s.d.) (Figura 89).

Em goiabeira, Natale et al. (2002) verificaram que doses de Zn aumentaram a matéria seca da parte aérea e das raízes das mudas (Figura 90).



**Figura 89.** Efeito do zinco residual aplicado a lanço, na produção da soja (Ritchey, 1978) (a) e em solução aos 15 dias após e emergência, na produção do arroz (Pereira & Vieira, s.d.) (b).



**Figura 90.** Efeito da aplicação de zinco em substrato do Argissolo Vermelho-Amarelo na produção de matéria seca da parte aérea e das raízes das mudas de goiabeira, aos 135 dias após o transplantio (Natale et al., 2002).

Assim, os efeitos positivos do Zn em doses moderadas foram observados, devido à conhecida função deste metal na síntese de auxina, que estimula o desenvolvimento e alongamento das partes jovens das plantas (Malavolta et al., 1997).

#### 11.4. Exigências nutricionais das culturas

##### a) Extração e exportação de nutrientes

Normalmente, a extração total das culturas é maior para as gramíneas, como cana-de-açúcar (720 g ha<sup>-1</sup>) e o milho (544 g ha<sup>-1</sup>), comparadas às leguminosas como a soja (145 g ha<sup>-1</sup>), (Tabela 61).

A exigência das culturas em zinco não atinge 1 kg ha<sup>-1</sup>; entretanto, sua presença nas plantas é fundamental, exercendo diversas funções no metabolismo (visto anteriormente), de forma que a redução custo/benefício deste micronutriente (e também para os demais) nos sistemas de produção é compensadora.

Quanto à exigência em zinco, por unidade de produto colhido, indica-se a cultura do arroz como a mais exigente (122 g t<sup>-1</sup>). Portanto, é importante o fornecimento deste nutriente de forma a suprir sua exigência e manter alta produção. A maior eficiência no uso do Zn por genótipos de arroz é determinado pela maior eficiência na absorção, tendo maior área superficial da raiz (Gao et al., 2005).

A soja e o café são as culturas que mais exportam o Zn durante a colheita, atingindo 42 e 40 g t<sup>-1</sup> de grãos, respectivamente.

## b) Marcha de absorção de nutrientes

A acumulação de Zn na soja é lenta, durante os primeiros 30 dias, e alta após os 30 dias da sementeira, atingindo a máxima velocidade no período de 60-90 dias; após isso, (90-120 dias) tem-se uma diminuição na velocidade de absorção, correspondendo à fase final do ciclo da planta (Tabela 62).

**Tabela 61.** Exigências de zinco das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida t ha <sup>-1</sup>	Zn acumulado		Zn requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup> g t <sup>-1</sup>
			Parte da planta	Total <sup>(3)</sup> g ha <sup>-1</sup>	
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	16 (5) <sup>(2)</sup>		
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7(m.s.)	42	60	46
	Raiz	0,5 (m.s.)	2		
<b>Soja</b>	Grãos (vagens)	2,4	102 (42)	145	60
	Caule/ramo/folha	5,6	43		
<b>Feijão</b>	Grãos	0,9		0,03	
	Caule	0,4			
	Folhas	1,2		-	-
	Raiz	0,1			
<b>Milho</b> <sup>(1)</sup>	Grãos	6,4	178 (28)	544	85
	Restos culturais	-	366		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	30 (10)	366	122
	Colmos	2	101		
	Folhas	2	38		
	Casca	1	147		
	Raiz	1	50		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	40 (13)	90	30
	Palha	3,7	50		
<b>semi-perene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	500 (5)	720	7,2
	Folhas	25	220		
<b>Cafeeiro</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (coco)	2	80 (40)		
	Tronco, ramos e folhas	-	-	-	-

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (g t<sup>-1</sup>): Zn acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Zn da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Zn acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

**Tabela 62.** Marcha de absorção (cumulativa) de zinco na soja (Bataglia & Mascarenhas, 1977)

Período (dias após a semeadura)	Zn absorvido, g/ha/dia
0-30	0,4
30-60	2,0
60-90	2,1
90-120	1,2

### 11.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

#### a) Deficiências

Normalmente, a deficiência de Zn nas diversas espécies é o encurtamento dos internódios, e a folha torna-se pequena; entretanto, têm-se faixas amareladas (ou brancas) entre a nervura e bordas das folhas (Figura 91). As plantas deficientes em Zn podem levar a clorose induzida por deficiência de Fe, entretanto, os sintomas de folhas pequenas caracterizam a deficiência de Zn.

Em plantas deficientes em Zn, pode ter alto teor de P, visto o desarranjo das membranas e paralelamente tem-se inibição da redistribuição do P da parte para a raiz.

DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA	NUTRIENTE: ZINCO
FOTOS	DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
	<p>Inicia-se com estrias cloróticas na folha, e em seguida forma-se uma faixa larga de tecido clorótico de cada lado da nervura central, mas não se estendendo à margem da folha, exceto em casos severos de deficiência; tecidos internervais permanecem verdes inicialmente, mas logo toda a lâmina foliar pode tornar-se clorótica, estendendo-se para a base; folhas perceptivelmente curtas e largas na parte média e assimétricas; necrose na ponta da folha quando a deficiência é severa; perfilhamento reduzido e internódios mais curtos; colmos finos.</p>
Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR	
 <p>(a) (b) (c) (d)</p>	<p>Os sintomas iniciam nas folhas mais novas (Foto 2a), em faixas brancas ou amareladas entre a nervura principal e as bordas (foto 2b), podendo seguir-se necrose e ocorrer tons roxos; as folhas novas se desenrolando na região de crescimento são esbranquiçadas ou de cor amarelo-pálida e deformadas (Foto 2c); internódios curtos. E as espigas são pequenas e sem grãos na ponta (Foto 2d).</p>
Foto 2. MILHO	
 <p>(a) (b)</p>	<p>Os folíolos com deficiência de zinco ficam menores, com áreas cloróticas entre as nervuras, sendo estes sintomas mais severos nas folhas basais (Foto 3a). As folhas cloróticas com deficiência apresentam cor amarelo-castanho e morrem prematuramente (Foto 3b). A soja deficiente em Zn será de cor amarelo castanho quando vista à distância. A maturação será atrasada e poucas vagens serão produzidas.</p>
Foto 3. SOJA	
	<p>O sintoma inicial de deficiência é uma coloração verde esbranquiçada que se desenvolve no tecido, na base da folha de cada lado da nervura central. A lâmina da folha tem um alargamento proeminente na zona de clorose. A medida que a folha se torna mais velha, o tecido clorótico adquire coloração ferruginosa. O crescimento da planta é atrofiado e as folhas, de cor ferrugem, tornam-se proeminentes em estágios posteriores.</p>
Foto 4. ARROZ	
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>	

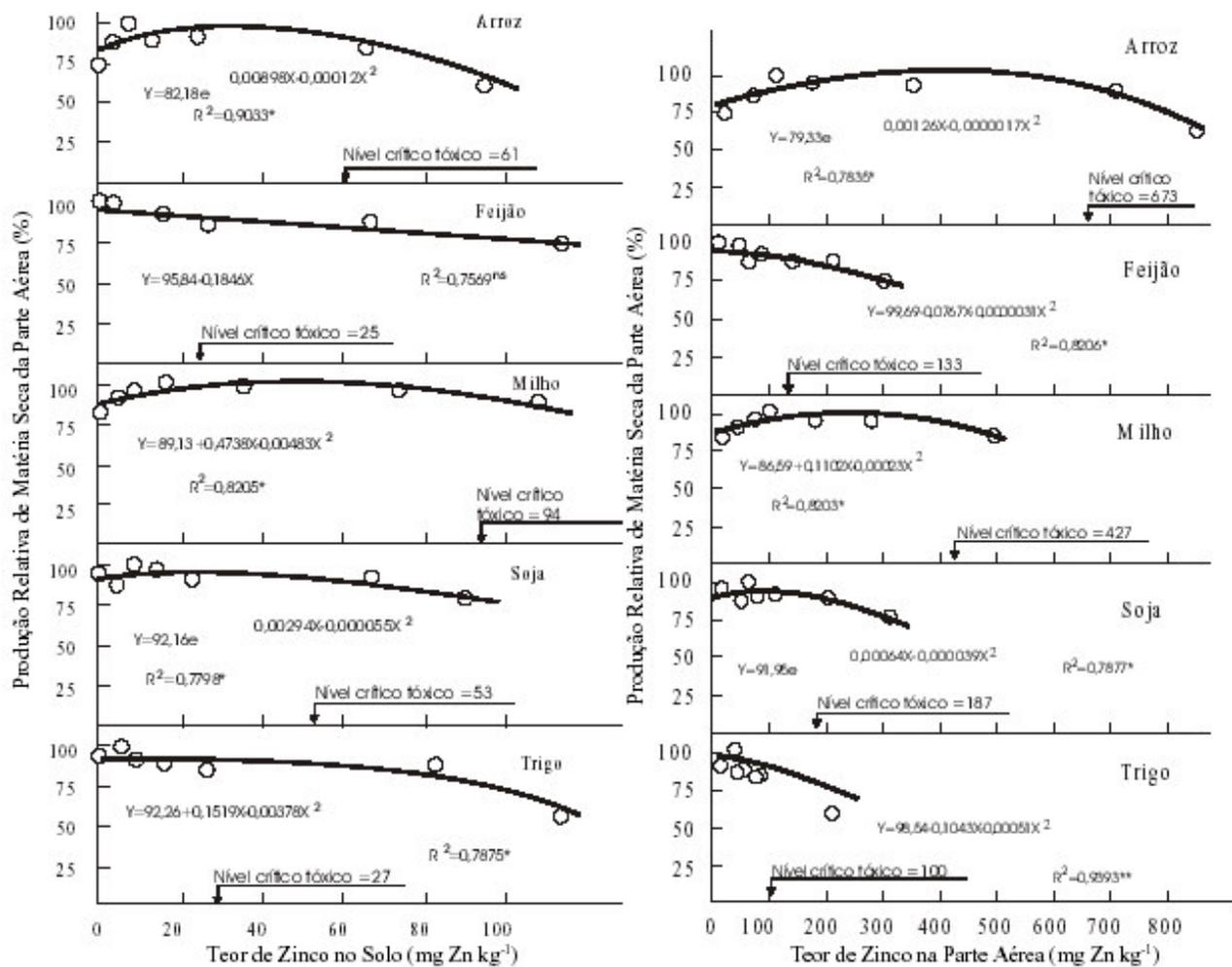
Figura 91. Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Zn em diversas culturas.

**b) Excessos**

A toxidez de Zn manifesta-se pela diminuição da área foliar, seguida de clorose, podendo aparecer na planta toda um pigmento pardo-avermelhado, talvez um fenol. Além disso, faz diminuir a absorção de K. No xilema de algumas plantas intoxicadas por Zn acumulam-se tampões “plugs”, contendo o elemento, os quais dificultam a ascensão da seiva bruta (Malavolta et al., 1997).

Além disso, o excesso de Zn, pode provocar sintomas também semelhantes à deficiência de Fe. Existem plantas com alta tolerância a Zn, podendo atingir teor de 20 g de Zn kg<sup>-1</sup> (Küpper et al., 1999). Fageria (2000c) estudou o efeito do Zn no sistema solo-planta sobre a produção de matéria seca (Figura 92), e diferentemente do B, as doses de Zn adequadas e tóxicas são mais largas, variando de 1-10 até 40-110 mg Zn kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente, enquanto os teores adequados de zinco na planta variaram de 18 a 67 mg kg<sup>-1</sup> da matéria seca da parte aérea e os tóxicos de 100 a 673 mg kg<sup>-1</sup>, dependendo da cultura. Em girassol, a deficiência e toxidez em Zn ocorreu com teor de 20 e 240 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Khurana & Chatterjee, 2001). Segundo este último autor, o excesso de Zn, provocou diminuição significativa, além da biomassa, na concentração de clorofolia (a, b) e proteínas solúveis nas plantas.

Em amendoim, tem-se toxidez de Zn, quando a relação Ca:Zn é igual ou inferior a 50 (Parker et al., 1990).



**Figura 92.** Relação entre teor de zinco no solo e na parte aérea e produção relativa de matéria seca da parte aérea das culturas de arroz, feijão, milho, soja e trigo, em solo de cerrado (Fageria, 2000c).

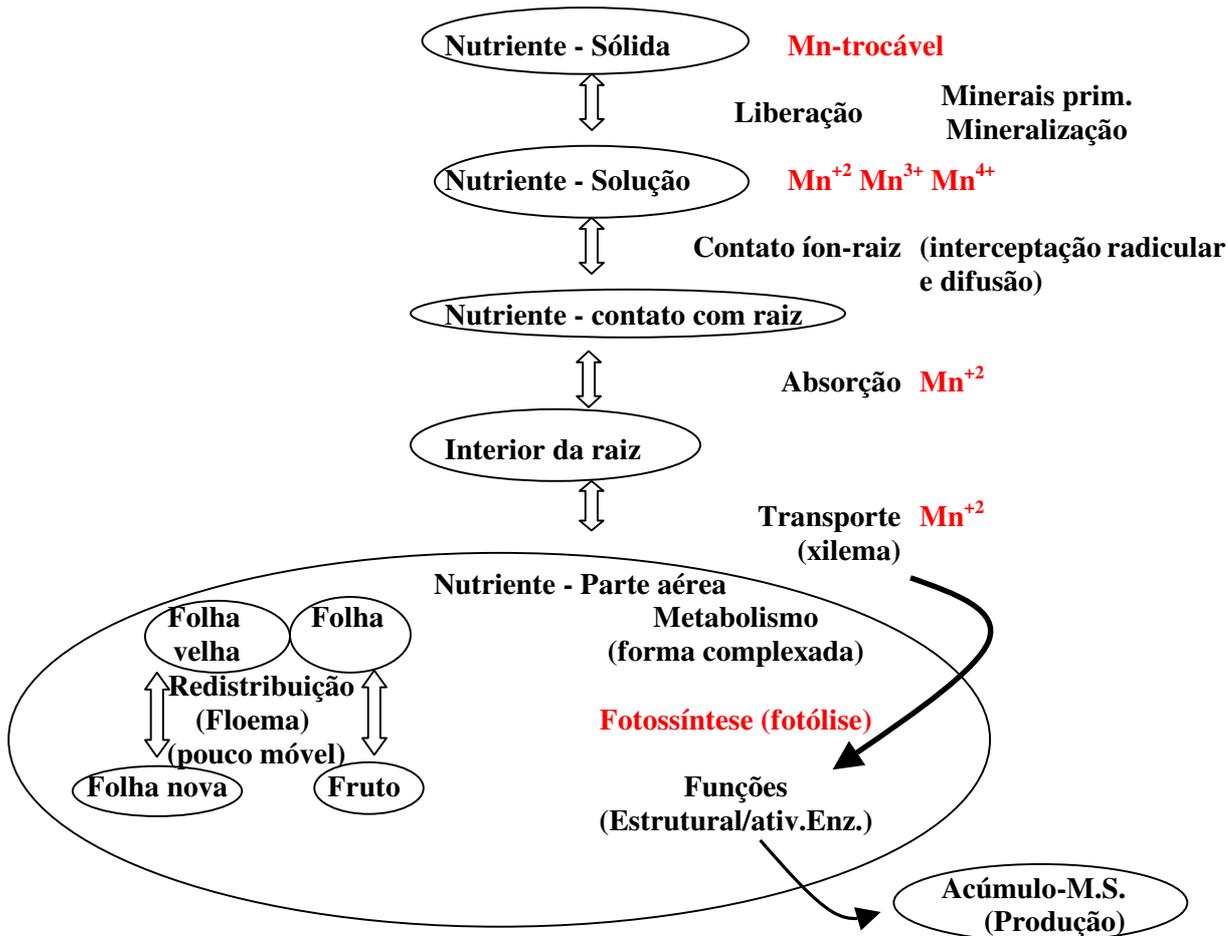
## Capítulo 12 Manganês

### 12.1 Introdução

Diferentemente do B e do Zn, o Mn é o segundo micronutriente mais abundante em solos tropicais, perdendo apenas para o Fe. A disponibilidade de manganês no solo depende principalmente do pH, do potencial de oxirredução, da matéria orgânica e do equilíbrio com outros cátions (Fe, Ca e Mg). Nos processos de intemperização da rocha matriz, ocorre a liberação do manganês, o qual é rapidamente transformado em óxidos  $Mn^{3+}$  ( $Mn_2O_3 \cdot n H_2O$ ) ou  $Mn^{4+}$  ( $MnO_2 \cdot n H_2O$ ) por meio de reações químicas e biológicas, e apenas uma pequena parte permanece na solução do solo como íon  $Mn^{2+}$ , que é a forma disponível às plantas (Bartlett, 1998). Assim, os resultados destas reações químicas e especialmente as biológicas, é que pode levar a maior ou menor concentração de formas disponíveis, às plantas. Portanto, o conhecimento destas reações do Mn no sistema solo permitiria um manejo mais adequado do nutriente, beneficiando a nutrição das plantas.

Em solos ácidos, pode ocorrer concentração alta de Mn, podendo levar a problemas de toxidez nas plantas, ao passo que solos receberam altas doses de materiais corretivos para correção da acidez, pode induzir baixa disponibilidade de Mn, causando deficiências nas plantas, especialmente em solos originalmente pobres. Assim, é importante manter no solo concentrações adequadas de Mn, sendo mais vantajoso à aplicação de Mn, em solos com concentrações baixas ( $<1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ ) ou média ( $1,5-5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (extrator DTPA) (Raij et al., 1996), as quais as respostas das culturas são maiores. Normalmente, respostas a manganês são de ocorrências mais prováveis em solo com teores altos de matéria orgânica, de pH alto, calcários ou arenosos (Wiese, 1993) e com altos índices pluviométricos.

No estudo do manganês no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo; raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até na sua incorporação em um composto orgânico ou como um ativador enzimático, que desempenhará funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc) (Figura 93).



**Figura 93.** Dinâmica do manganês no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

## 12.2 Absorção, transporte e redistribuição do manganês

### a) Absorção

O caminhar do manganês no solo até as raízes ocorre por meio dos mecanismos de interceptação radicular e difusão, necessitando, portanto, de aplicações do nutriente localizado próximo ao sistema radicular das plantas.

O manganês é absorvido pelas raízes ativamente na forma  $Mn^{2+}$ . Como o  $Mn^{2+}$ , tem propriedades químicas semelhantes (o raio iônico) aos nutrientes  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ , e, especialmente,  $Mg^{2+}$ , a presença destes pode inibir sua absorção e até o transporte. Salienta-se, que a absorção do Cu, Zn e Fe, pode dobrar com a deficiência de Mn (Yu & Rengel, 1999). Entretanto, o contrário também é verdadeiro, com ênfase para o  $Fe^{2+}$ .

**b) Transporte**

O transporte no xilema se faz na forma catiônica  $Mn^{2+}$ , visto que o quelado do Mn com o ácido cítrico têm baixa constante de estabilidade e dissocia-se facilmente, podendo ser deslocado e ficando sujeito à precipitação com ânions como  $H_2PO_4^-$ .

**c) Redistribuição**

O transporte de Mn é unidirecionalmente pelo xilema, das raízes para a parte aérea, sendo o contrário é muito pequeno, devido à sua concentração no floema ser muito baixa, portanto redistribuição limitada.

**12.3 Participação no metabolismo vegetal**

Dentro da célula,  $Mn^{2+}$  forma ligações fracas com ligantes orgânicos e pode ser rapidamente oxidado para  $Mn^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$  e  $Mn^{6+}$ . Por causa dessa relativa facilidade de mudança no estado de oxidação, o Mn apresenta importante função nos processos de oxirredução na planta, como o transporte de elétrons na fotossíntese e desintoxicação dos radicais livres de  $O_2$  ( $O_2^-$ ).

O manganês está envolvido em sistemas enzimáticos das plantas seja como constituinte (co-fator), seja como ativador de enzimas.

O Mn participa diretamente na composição química de duas enzimas (enzima S e dismutase de peróxido), em que desempenham suas funções nas plantas:

A enzima S contém quatro átomos de Mn, a qual desempenha a função mais conhecida deste nutriente nas plantas, junto com o cloro, que é a quebra fotoquímica da molécula de água (reação de Hill) para liberação de elétrons para fotossíntese (FSII):  $2H_2O \Rightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$ . A redução da fotossíntese, também pode ser afetada mais pela destruição dos cloroplastos, diminuindo a concentração de clorofila (Mn está ligado nas estruturas das membranas dos tilacóides).

E, ainda, com o fluxo de elétrons prejudicado, tem-se correspondente efeito negativo nas reações subsequentes como: fotofosforilação; fixação do  $CO_2$ ; redução do nitrito e do sulfato.

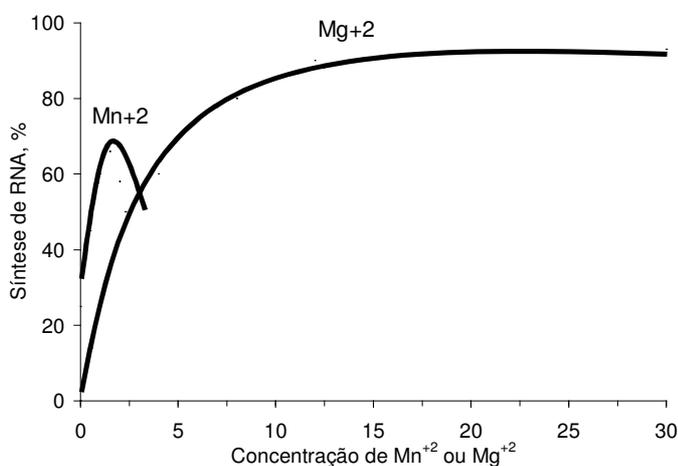
Ressalta-se que a inibição da reação de Hill pode levar à formação de radicais livres  $O_2^-$ , e para eliminar este efeito prejudicial (necrose), a ação da enzima dismutase de peróxido é essencial e a mesma é constituída de Mn.

Além destas enzimas citadas, o Mn atua como co-fator ativando mais de 30 enzimas, sendo que da mesma forma que o Mg, atuam formando pontes entre o ATP, e as enzimas transferidoras de grupos (fosfoquinases). A maioria das reações das enzimas ativadas pelo Mn, estão relacionadas ao ciclo de krebs (respiração). São reações de oxirredução, descarboxilação ou reações hidrolíticas. Uma enzima importante ativada pelo Mn é a redutase de nitrito, uma vez que esta viabiliza a redução do N e posteriormente sua incorporação nos esqueletos de carbono.

Assim, o Mn participa de vários processos nas plantas, que podem ser resumidos da seguinte forma:

A deficiência de Mn diminui a alongação celular podendo reduzir o crescimento radical, indicando inibição do metabolismo lipídico ou de ácido giberélico ou, ainda, menor fluxo de carboidratos para as raízes.

Como o manganês ativa a RNA polimerase, tem-se um efeito indireto na síntese de proteínas e na multiplicação celular, embora, em caso de deficiência de Mn, a atividade enzimática seja mais afetada que a síntese de proteína. Salienta-se, ainda, que o Mg pode também ativar esta enzima, entretanto, o Mn é muito mais eficiente. Para a mesma atividade, a enzima requer uma concentração de Mg dez vezes maior que a de Mn (Figura 94).



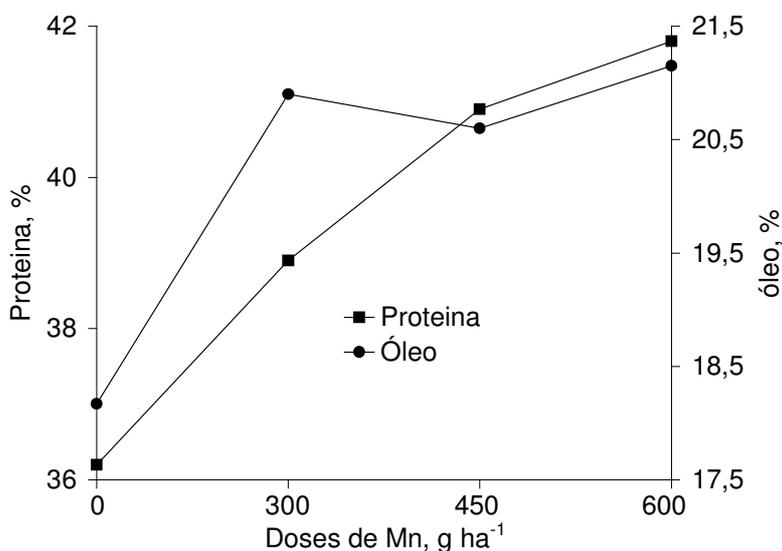
**Figura 94.** Influência do magnésio e do manganês sobre a síntese de RNA em cloroplasto (Adaptado de Mess & Woolhoudr, 1980, citados por Marschner, 1986).

Assim, em plantas deficientes em Mn, tem-se, normalmente, um acúmulo de aminoácidos (N-Solúvel), devido à queda na fotossíntese, com reflexos na reduzida síntese de proteínas e também no teor de carboidratos (Tabela 63).

**Tabela 63.** Efeito da deficiência de manganês no crescimento e componentes orgânicos de plantas de feijão

Parâmetros	Folhas		Caule		Raiz	
	+Mn	-Mn	+Mn	-Mn	+Mn	-Mn
Matéria seca (g por planta)	0,6	0,5	0,6	0,4	0,2	0,1
N-protéico (mg g <sup>-1</sup> M.S.)	52,7	51,2	13,0	14,4	27,0	25,6
N-solúvel (mg g <sup>-1</sup> M.S.)	6,8	11,9	10,0	16,2	17,2	21,7
Carboidratos solúveis (mg g <sup>-1</sup> M.S.)	17,5	4,0	35,6	14,5	7,6	0,9

Diante do papel do Mn na síntese protéica, trabalhos indicam que o aumento do Mn pode levar a um aumento do teor de proteína e de óleo na semente de soja (Figura 95) (Mann et al., 2002). Cabe ressaltar a importância de teores adequados de proteína e óleo nas sementes, pois estes elementos são responsáveis pela determinação da qualidade e quantidade dos produtos finais, como o farelo e o óleo de soja.



**Figura 95.** Efeito do manganês no conteúdo de proteína e óleo de sementes de soja (cv. Garimpo), (aplicação foliar parcelada nos estádios V4 e V8.), (Mann et al., 2002).

Outro processo em que o Mn pode afetar na resistência das plantas a doenças, visto que este nutriente é ativador de uma série de enzimas importantes na biossíntese de metabólitos secundários, e a sua deficiência resulta na queda de concentração de inúmeras substâncias, como aminoácidos aromáticos, compostos fenólicos, cumarinas, ligninas, flavonóides e ácido indolacético, o que podem inibir ou dificultar a proliferação de patógenos (de solo ou não).

Malavolta et al. (1997) resumiram diversas enzimas ativadas pelo manganês e a influência nos processos biológicos das plantas (Tabela 64).

**Tabela 64.** Enzimas e processos biológicos influenciados pelo Mn (Malavolta et al., 1997)

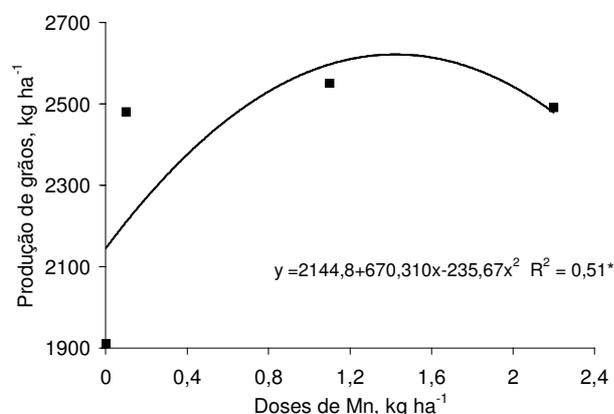
Ativador enzimático	Processos
Sintetase de glutathione	Absorção iônica
Ativação da metionina	Fotossíntese
ATPase	Respiração
Quinase pirúvica	Controle hormonal
Enolase	Síntese de proteínas
Desidrogenase isocítrica	Resistência a doenças
Descarboxilase pirúvica	
Pirofosforilase	
Sintetase de glutamilo	
Enzima málica	
Oxidase do ácido indolil acético	

Normalmente, as culturas apresentam probabilidade de resposta distintas à aplicação de Mn (Tabela 65).

Mascagni Júnior & Cox (1985), verificaram resposta positiva da soja à aplicação de Mn (via foliar) (Figura 96).

**Tabela 65.** Probabilidade de resposta de diferentes culturas ao manganês em condições de solo e climas favoráveis à indução de deficiências (Lucas & Knezek, 1973, citados por Marinho, 1988).

Probabilidade de resposta	Culturas
Baixa	Aspargo, milho, gramíneas forrageiras, centeio, arroz
Média	Alfafa, cevada, brócolos, repolho, cenoura, couve-flor, aipo, trevo, menta, batata, arroz, tomate, nabo, cafeeiro, cana-de-açúcar
Alta	Feijão, pepino, alface, cevada, ervilha, soja, sorgo, espinafre, beterraba, trigo, citrus, macieira, pêssego, videira, roseira, morangueiro, mandioca.



**Figura 96.** Efeito da aplicação de manganês na produção da soja (Mascagni Júnior & Cox, 1985).

## 12.4. Exigências nutricionais das culturas

Conforme dito anteriormente, o estudo da exigência nutricional das culturas deve refletir a extração total do nutriente do solo, respeitando a extração em cada fase de desenvolvimento da cultura, a fim de satisfazer às necessidades nutricionais das culturas visando à máxima produção econômica.

Salienta-se que o teor total de Mn na planta pode variar de 1-2% (10-20 g kg<sup>-1</sup>). Estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores, que será objeto de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente e a marcha de absorção deste nutriente ao longo do cultivo.

### a) Extração e exportação de nutrientes

A extração total de Mn é função do teor da planta e a quantidade de matéria seca acumulada. Portanto, depende da produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade do elemento no solo, do manejo da cultura, entre outros.

Quanto à espécie vegetal, nota-se variação da quantidade exigida em função das culturas (Tabela 66).

Pelos resultados das diversas culturas, observa-se que a extração total de Mn variou de 130 (algodoeiro) até 5700 g ha<sup>-1</sup> (cana-de-açúcar). Entretanto, em valor relativo de extração de manganês, em g por tonelada produzida, observa-se maior exigência do arroz (154 g kg<sup>-1</sup>), ao passo que a soja é a que mais exporta o Mn, com 43 g t<sup>-1</sup> de grãos produzidos.

### b) Marcha de absorção

O estudo da marcha de absorção do manganês (nutriente acumulado em função do tempo de cultivo) é importante porque permite determinar as épocas em que o elemento é mais exigido e corrigir as deficiências que, porventura venham ocorrer durante o desenvolvimento da cultura. Analisando a marcha de absorção da soja, observa-se pequena absorção no período inicial (0-30 dias) e no período seguinte (30-60 dias) a velocidade de absorção aumenta mais de 10 vezes, 3,2 g/ha/dia de Mn, indicando alta exigência nesta fase, atingindo o máximo no período de 60-90 dias, com 5,7 g/ha/dia de Mn (Tabela 67).

**Tabela 66.** Exigências de manganês das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida	Mn acumulado		Mn requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup>
			Parte da planta	Total <sup>(3)</sup>	
		t ha <sup>-1</sup>	g ha <sup>-1</sup>		g t <sup>-1</sup>
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	19 (15) <sup>(2)</sup>		
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	106	130	100
	Raiz	0,5	5		
<b>Soja</b>	Grãos (vagens)	2,4	102 (43)	312	130
	Caule/ramo/folha	5,6	210		
<b>Milho</b> <sup>(1)</sup>	Grãos	6,4	53 (8,3)	767	120
	Restos culturais	-	714		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	52		
	Colmos	2 (m.s.)	96		
	Folhas	2 (m.s.)	226	461	154
	Casca	1	57		
	Raiz	1(m.s.)	30		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	90 (30)	250	83
	Palha	3,7	160		
<b>semi-perene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	1200 (12)	5700	57
	Folhas	25	4500		
<b>Cafeeiro</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (coco)	2	40 (20)		
	Tronco, ramos e folhas	-	-	-	-

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (g t<sup>-1</sup>): Mn acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Mn da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Mn acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

**Tabela 67.** Marcha de absorção (cumulativa) de manganês da soja em solução nutritiva (Bataglia & Mascarenhas, 1977)

Período (dias após a semeadura)	Mn absorvido, g/ha/dia
0-30	0,3
30-60	3,2
60-90	5,7
90-120	-

Normalmente, a aplicação do Mn no sulco de plantio satisfaz à exigência da planta em todo o ciclo. Entretanto, em caso de ocorrência de sintomas iniciais de deficiência durante o desenvolvimento inicial da cultura, as informações do comportamento do Mn na nutrição da planta poderão auxiliar no manejo desta correção via foliar tanto para época como número de aplicações.

Quanto à definição da época de aplicação, as informações da marcha de absorção são valiosas. No caso da soja, o período inicial de maior velocidade de absorção ocorre após 30 dias da semeadura, portanto, a aplicação deve coincidir com essa época.

Quanto ao número de aplicações, é preciso conhecer a mobilidade do nutriente na planta e, como o Mn é pouco móvel, será preciso mais de uma aplicação, conforme resultados de aplicação do Mn em milho, onde Mascagni & Cox (1985) observaram que duas aplicações proporcionaram maior produção, comparado a uma aplicação (Tabela 68).

**Tabela 68.** Número e época de aplicações foliares de Mn na cultura do milho (Mascagni & Cox, 1985).

Doses de Mn <sup>(1)</sup>	Época de aplicação <sup>(2)</sup>		Produção
	4ª folha	8ª folha	
kg ha <sup>-1</sup>			kg ha <sup>-1</sup>
0,0	-	-	2210
1,1	1	-	5330
1,1	-	1	6690
1,1	1	1	8400

<sup>(1)</sup> Sulfato de manganês diluído em 150 L de água/ha. <sup>(2)</sup> 4ª folha (cerca de 30 dias) e 12ª folha (cerca de 45 dias). Mn do solo (Mehlich 3)=2,8 mg dm<sup>-3</sup>; pH em água=6,3

## 12.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais de manganês

### a) Deficiência

De maneira geral, a deficiência de Mn é caracterizada por clorose (amarelecimento) da superfície das folhas jovens, podendo progredir para entre as nervuras, conhecida por um reticulado grosso (as nervuras formam rede verde espessa sobre um fundo amarelo) (Figura 97). Salienta-se, porém, que os sintomas de deficiência podem variar em função da espécie.

**b) Excessos**

A toxicidade aparece, inicialmente, também em folhas jovens, caracterizada por clorose marginal, pontuações marrons que evoluem para necróticas na superfície do limbo e encarquilhamento das folhas, especialmente em leguminosas. Nestes pontos necróticos é que se acumula o Mn em altas concentrações.

Uma forma de aliviar a toxidez por  $Mn^{+2}$ , seria aumentando-se a disponibilidade de Mg no solo, o que reduz a absorção do Mn (Mengel & Kirkby, 1987).

<b>DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA</b>		<b>NUTRIENTE: MANGANÊS</b>
<b>FOTOS</b>		<b>DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS</b>
 <p>(a) (b)</p>		<p>Clorose internerval da ponta até o meio das folhas (Foto 1a); e os detalhes das estrias cloróticas que podem tornar-se brancas e necróticas (Foto 1b).</p>
<b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>Clorose internerval das folhas mais novas (reticulado grosso de nervuras) e depois de todas elas quando a deficiência for moderada; em casos mais severos aparecem no tecido faixas longas e brancas e o tecido do meio da área clorótica pode morrer e desprender-se; colmos finos.</p>
<b>Foto 2. MILHO</b>		
		<p>A deficiência de Mn provoca clorose entre as nervuras das folhas mais novas. Exceto as nervuras, as folhas de soja tornam-se verde-pálido e passam para amarelo-pálido. Áreas necróticas marrons desenvolvem-se nas folhas à medida que a deficiência torna-se severa. A deficiência de Mn difere da de Fe devido às nervuras permanecerem verdes e aparecerem ressaltadas, de forma saliente.</p>
<b>Foto 3. SOJA</b>		
 <p>(a) (b)</p>		<p>A clorose inicia-se nas folhas mais novas dos ramos (Foto 4a). Aparecem no início muitos pontinhos esbranquiçados nas folhas mais novas os quais depois se juntam tomando uma cor amarelada quase gema de ovo (Foto 4b).</p>
<b>Foto 4. CAFÉ</b>		
<b>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</b>		

**Figura 97.** Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Mn em diversas culturas.

## Capítulo 13. Ferro

### 13.1 Introdução

Existem diversos fatores que podem afetar o ferro disponível do solo: o desequilíbrio em relação aos outros metais (Mo, Cu e Mn), o excesso de P, os efeitos do pH elevado (calagem excessiva), encharcamento do solo, as baixas temperaturas, entre outros.

Assim, é importante manter no solo concentrações adequadas de Fe, sendo mais vantajosa a aplicação do nutriente em solos com concentrações considerado baixo ( $<5 \text{ mg dm}^{-3}$ ) ou média ( $5-12 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (extrator DTPA) (Raij et al.,1996), as quais as respostas das culturas são maiores. Normalmente, o suprimento adequado de ferro às plantas depende muito mais das condições de pH, da umidade e de aeração do que propriamente da quantidade presente no solo, que é normalmente abundante. A disponibilidade de ferro é maior nos solos com pH ácido ( $<6,0$ ) e com a diminuição do potencial de oxirredução (Eh) do solo. Em solos muito aerados a concentração iônica  $\text{Fe}^{2+}$  é muito baixo. Portanto, não são raras deficiências de Fe em determinadas regiões cultivadas no Brasil.

No estudo do Fe no sistema planta, é importante conhecer os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo, raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até a sua incorporação em um composto orgânico ou como um ativador enzimático que desempenhará funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.) (Figura 97).

### 13.2 Absorção, transporte e redistribuição de ferro

#### a) Absorção

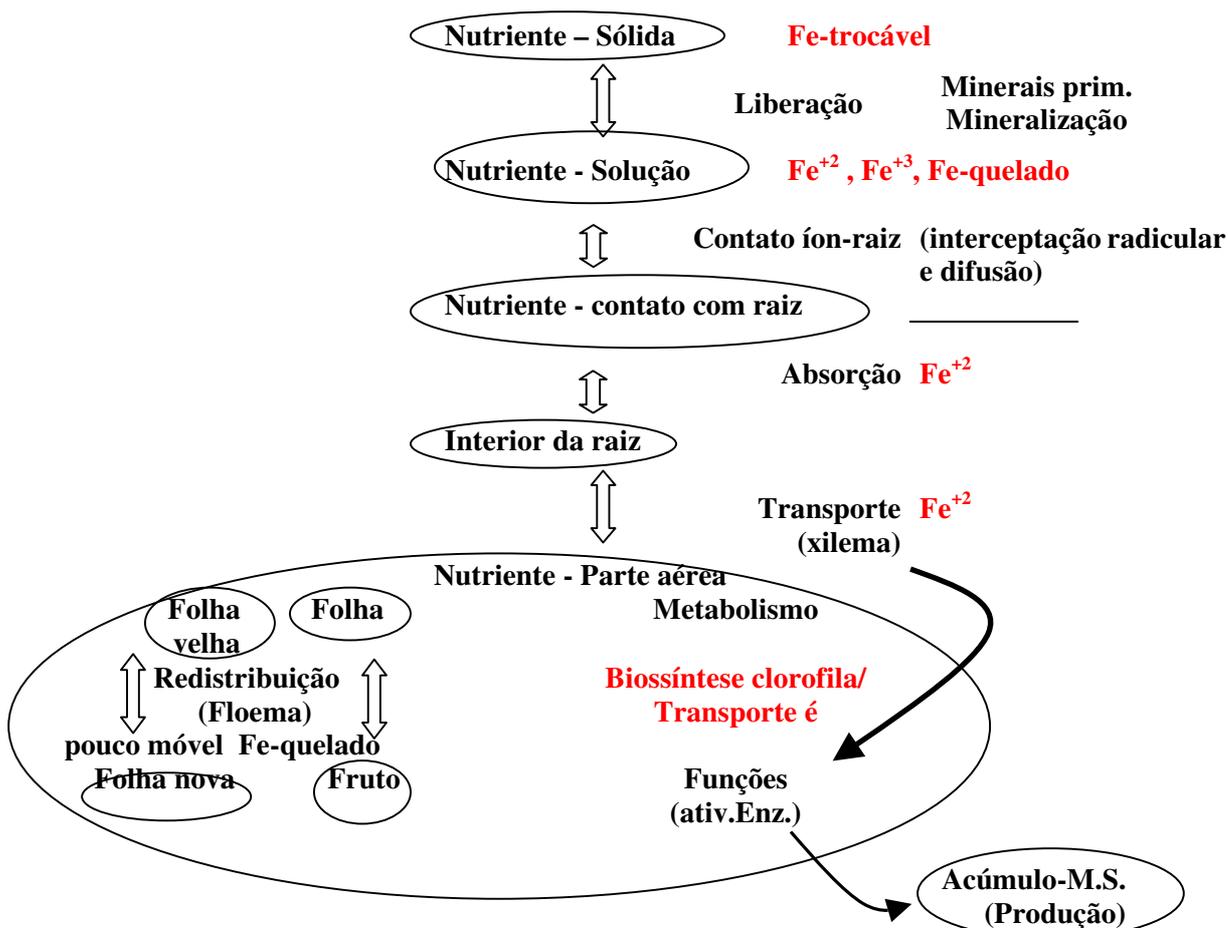
O contato Fe-raiz recebe maior contribuição do fluxo de massa; entretanto, o processo de difusão e interceptação radicular também são importantes. Oliver & Barber (1966) indicaram que o mecanismo de movimento do Fe no solo pode variar com as condições ambientais, sendo que em condições de baixa transpiração a difusão sempre deve dominar o transporte do nutriente no solo.

Salienta-se que existem fatores importante que diminuem o fluxo difusivo de Fe nos solos como nível baixo de umidade e aumento do valor pH e da concentração de P (Nunes et al.,2004), o que pode

diminuir o movimento do elemento no solo e portanto contato com a raiz, podendo causar deficiência de Fe nas culturas.

A forma preferencial absorvida pelas raízes é  $Fe^{2+}$ , entretanto, poderá ser absorvido como  $Fe^{+3}$  e Fe-quelatado. A atividade das H-ATPases presente nas membranas podem induzir efluxos de compostos fenólicos (quelatos) e  $H^+$  que podem solubilizar o Fe (hidróxido) e quelatiza-lo até chegar a superfície da raiz (ou no ELA) e pela ação das redutases desquelatiza-lo liberando o  $Fe^{+2}$  para sua absorção. Portanto, as plantas que apresentam maior habilidade na absorção de ferro são capazes de reduzir, na rizosfera, o  $Fe^{3+}$  para  $Fe^{2+}$ , pelo efluxo de prótons (Diem et al., 2000). Além, disso a quantidade de  $Fe^{+3}$ , é baixa em solos cultivados (pH ~6,5) [ $Fe^{+3} + 3OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_3$ ]. Uma outra forma de absorção de Fe seria via sideróforo (quelato), especialmente em gramíneas, onde este quelato de Fe, seria absorvido, sem a redução.

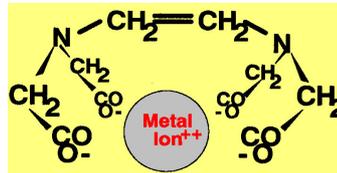
Cabe salientar, que concentrações elevadas de outros íons na solução do solo podem inibir por competição iônica a absorção de Fe.



**Figura 97.** Dinâmica do ferro no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

## b) Transporte

O transporte do ferro se dá pelo xilema, via corrente respiratória, predominantemente na forma de quelato do ácido cítrico. O quelato significa “pinça”, em que o metal fica envolvido por um composto orgânico (Figura 98), evitando reações do metal com outras substâncias do meio.



**Figura 98.** Esquema de um quelato.

Salienta-se que Soares et al. (2001) verificaram em estudos com eucalipto com doses de Zn, em solução nutritiva, que a translocação de Fe das raízes para a parte aérea foi reduzida, independentemente da espécie, de 21% no controle para apenas 2% em 1.600  $\mu\text{M}$  de Zn, indicando forte relação entre a queda na produção de matéria seca e a ocorrência da deficiência induzida de Fe nas plantas.

## c) Redistribuição

O ferro é pouco redistribuído na planta; portanto, os sintomas de deficiência aparecem nas folhas mais novas. Cabe salientar que pode ocorrer teor foliar alto em plantas deficientes em ferro, uma vez que o elemento pode estar presente no tecido vegetal na forma de complexos ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ou precipitado (Fe-P).

## 13.3 Participação no metabolismo vegetal

A maior parte do ferro nas plantas (~ 80%) está localizada nos cloroplastos, como fitoferritina (proteína de reserva) portanto, com influência na fotossíntese. Em geral, o ferro é importante na biossíntese de clorofila e proteínas, e nos constituintes enzimáticos que transportam elétrons e também na ativação de enzimas. Ele é essencial para síntese de proteínas e ajuda a formar alguns sistemas respiratórios enzimáticos.

### Biossíntese de clorofila e proteína

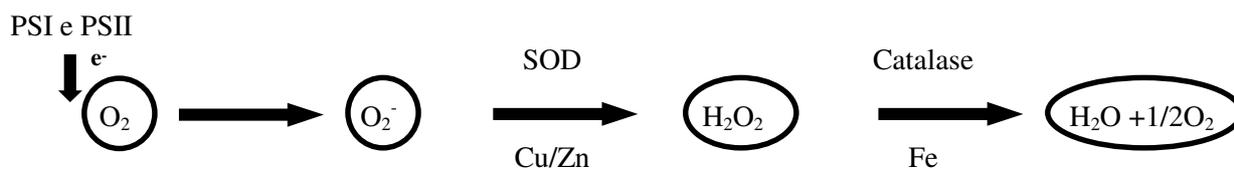
Participa da biossíntese de clorofila. O Fe é importante na reação que resulta na formação do ALA (ácido delta amino levulínico) que é o precursor da porfirina, componente da clorofila. Além disso, faz parte do grupo heme das enzimas citocromos, catalases e peroxidases e também da leghemoglobina. Na síntese de proteínas, especialmente a dos cloroplastos, o Fe participa de uma proteína dos ribossomos (local da síntese) e também reflete o aumento do teor de RNA.

### Compostos de citocromos e ferredoxina

O Fe, participa de dois grupos principais de proteínas que contêm ferro na planta: as hemoproteínas e as proteínas com grupos Fe-S. No primeiro grupo tem-se citocromos, presentes na mitocôndria, que transporta elétrons para respiração, entre outras (citocromo-oxidase, catalase, peroxidase e a leg-hemoglobina). No outro grupo, tem-se a ferredoxina, presente na membrana dos tilacóides dos cloroplastos, que transporta elétrons para os processos metabólicos da fotossíntese, redução do  $N_2$  (a fixação biológica); nitrito; sulfato e até na incorporação do N (GOGAT).

### Ativação de enzimas

Durante o metabolismo das plantas, a produção do  $H_2O_2$  (oxidante energético) é deletério as células. As enzimas catalase e peroxidase (heme proteína), quando ativadas pelo Fe, inativa esta substância tóxica das células ( $H_2O_2 - Fe \Rightarrow H_2O + 1/2O_2$ ). De forma semelhante, o Fe também ativa a superóxido dismutase (SOD) que inativa  $O_2^-$  em  $H_2O_2$  que, pela ação das enzimas anteriores, forma  $H_2O$ .



**Figura 99.** Efeito dos sistemas enzimáticos na inativação dos radicais livres.

O Fe também está envolvido na síntese de lipoxigenase (hemoenzima) que catalisa a oxidação dos ácidos linoléico e linolênico em vários outros compostos (incluindo traumatina e ácido jasmônico), e portanto, a deficiência pode afetar o crescimento, senescência e resistência às doenças.

As funções do Fe nas plantas podem ser resumidas como constituintes de compostos e também ativador enzimático e com reflexos em processos fisiológicos vitais na vida das plantas (Tabela 69).

**Tabela 69.** Resumo das funções do ferro nas plantas (Malavolta et al., 1997).

Constituinte/Ativador enzimático	Processos
Heme-peroxidase	Fotossíntese
Catalase	Respiração
Oxidase do citocromo	Fixação biológica de N
Leghemoglobina	Assimilação de N e S
Redutase de sulfito	
Oxidase de sulfito	
Ferrodoxina	
Desidrogenase	
Nitrogenase	
Redutase de nitrito	
Redutase de nitrato	
Hidrogenase	
Aconitase	

### 13.4 Exigências minerais das principais culturas

Nota-se que a exigência em Fe pelas culturas varia, de 6442,6 g ha<sup>-1</sup>(cafeeiro) e até 8890 g ha<sup>-1</sup> (cana-planta), enquanto a exportação pela colheita varia de 12,7 g t<sup>-1</sup> (cana-soca) até 408 g t<sup>-1</sup> (alface) (Tabela 70).

Normalmente, as culturas apresentam probabilidade de resposta distinta à aplicação de ferro (Lucas & Knezek, 1973). Baixa probabilidade de resposta: menta e trigo; Média: alfafa, aspargo, repolho, milho, aveia, cafeeiro; Alta: feijões, cevada, brócolos, couve-flor, soja, sorgo, espinafre, beterraba, arroz, tomateiro, citrus, macieira, pessegueiro, pereira, videira, roseira, morangueiro, abacaxizeiro.

Observa-se que a marcha de absorção de ferro na cultura da soja ocorre lenta no início de crescimento da planta, atingindo máximo no período de 60-90 dias, e a partir daí tem-se queda acentuada até final do ciclo de produção (Tabela 70).

**Tabela 70.** Exigências de ferro de algumas culturas

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida t ha <sup>-1</sup>	Fe acumulado		Fe requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup> g t <sup>-1</sup>
			Parte da planta	Total <sup>(3)</sup> g ha <sup>-1</sup>	
<b>Anuais</b>					
<b>Alface<sup>(1)</sup></b>	Parte aérea	0,91	372(408) <sup>(2)</sup>	-	-
<b>Feijão</b>	Grãos	1	262 (262)	-	-
<b>Citrus</b>	Frutos	1	66 (66)	-	-
<b>Cafeeiro (6 anos)</b>	Caule	1,97	901,5	6442,6	1049,3
	Ramos	4,07	794,2		
	Folhas	3,56	3082,9		
	Frutos	6,14	1663,9(271)		
<b>Cana-planta</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	2378(23,8)	8890	88,9
	Folhas		6512		
<b>Cana-soca</b>					
	Colmos	100	1207(12,7)	5745	57,5
	Folhas		4538		

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (g t<sup>-1</sup>): Fe acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Fe da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Fe acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

**Tabela 71.** Marcha de absorção (cumulativa) de ferro na soja (cv. Santa rosa) em solução nutritiva (Bataglia & Mascarenhas, 1977).

Período (dias após a semeadura)	Fe absorvido, g/ha/dia
0-30	5,7
30-60	9,0
60-90	15,4
90-120	2,6

### 13.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais de ferro

#### a) Deficiência

Os sintomas aparecem, inicialmente nas partes jovens das plantas, como uma clorose (folhas 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 das nervuras sobre o fundo amarelo) podendo evoluir para um “branqueamento” (Figura 100). Entretanto, com a evolução da sintomatologia até as nervuras tornam-se cloróticas. Salienta-se, portanto, que o Fe acumula-se nas folhas mais velhas, na forma

de óxidos insolúveis ou de compostos inorgânicos (Fe-P), que diminui sua entrada no floema, portanto, provocando os sintomas de deficiência nas folhas novas.

A planta deficiente em ferro provoca alterações fisiológicas (diminuição da clorofila e da taxa fotossintética) e bioquímicas (diminuição da atividade da peroxidases e catalase e aumento da concentração de  $H_2O_2$ ) (Molassiotis et al., 2006).

Assim, vários fatores podem provocar deficiência de Fe nas plantas, tais como: baixo nível de Fe no solo, alto nível de P no solo, temperaturas extremas, diferenças genéticas, baixo conteúdo de matéria orgânica em solos ácidos e  $CaCO_3$  livre (Lucas & Knezek, 1972).

#### **b) Excessos**

A toxidez de ferro pode ocorrer em períodos de excesso de chuvas ou em solos alagados, como o arroz inundado (redução de  $Fe^{3+} \Rightarrow Fe^{2+}$ ) e nas plantas o teor pode atingir 50 mg de Fe  $kg^{-1}$  de matéria seca.

Já a ação tóxica do Mn é normalmente evidenciada na parte aérea das plantas, as raízes parecem insensíveis às altas concentrações de Mn e afetadas somente de forma indireta, como resultado da inibição no crescimento da parte aérea (Foy, 1976).

Em sorgo, o excesso de Fe torna as folhas mais claras, com lesões desde enegrecidas até cor palha nas margens. Na soja, a toxidez de Fe é similar a Mn, exceto no caso de excesso de Fe, as folhas são menos quebradiças que com excesso de Mn.

Cabe ressaltar que em algumas situações, o excesso de Fe inibe a absorção de Mn e, assim, os sintomas podem ser semelhantes à deficiência de Mn.

Foy et al. (1978), complementam, que a toxidez de manganês é difícil de ser estudada isoladamente, por causa das interações existentes entre ele e outros elementos, tais como fósforo, cálcio, ferro, alumínio e silício. Os autores indicam que tais interações podem ser responsáveis pela diversidade de sintomas em plantas e pelas reduções produzidas no crescimento pelo excesso de manganês em diferentes espécies.

<b>DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA</b>		<b>NUTRIENTE: FERRO</b>
<b>FOTOS</b>		<b>DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS</b>
 <p>(a) (b)</p> <p><b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b></p>		<p>Inicia-se com uma clorose internerval da ponta para a base das folhas (Foto 1a); a planta inteira pode tornar-se clorótica ou branca quando a deficiência for severa (Foto 1b).</p>
 <p>(a) (b)</p> <p><b>Foto 2. MILHO</b></p>		<p>Tem-se uma clorose internerval em toda a extensão da lâmina foliar, permanecendo verdes apenas as nervuras (reticulado fino de nervuras) nas folhas mais novas (foto 2a) que progride para as folhas velhas, atingindo toda a planta (foto 2b).</p>
 <p>(a) (b)</p> <p><b>Foto 3. SOJA</b></p>		<p>Os sintomas característicos é uma clorose internerval (reticulado fino) que ocorrem nas folhas mais novas (foto 3 a,b); com a evolução dos sintomas a cor verde é completamente perdida, inclusive as nervuras principais.</p>
 <p>(a)</p> <p><b>Foto 4. CAFÉ</b></p>		<p>As folhas mais novas ficam amarelas, as nervuras permanecendo verdes, depois amarelecendo.</p>
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>		

**Figura 100.** Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Fe em diversas culturas.

## Capítulo 14 Cobre

### 14.1 Introdução

O cobre apresenta-se no solo na forma de  $\text{Cu}^{2+}$ , fortemente ligado aos colóides organo-minerais. A proporção do cobre complexado pelos compostos orgânicos na solução do solo pode atingir 98%. Assim, a forma orgânica tem papel importante na regularização da sua mobilidade e disponibilidade na solução do solo. Portanto, pode-se inferir que quanto maior o teor de matéria orgânica, menor a disponibilidade de cobre as plantas. A disponibilidade deste elemento está fortemente relacionada ao valor pH do solo.

É importante manter no solo concentrações adequadas de Cu, sendo mais vantajosa à aplicação de Cu, em solos com concentrações considerado baixo ( $<0,3 \text{ mg dm}^{-3}$ ) ou médio ( $0,3-1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (extrator DTPA), (Raij et al., 1996), para as quais as respostas das culturas são maiores. Normalmente, as culturas mais suscetíveis à deficiência de cobre são os cereais (trigo, milho, arroz, aveia, cevada); entretanto, pode ocorrer em outras culturas (hortaliças e fruteiras), (Gupta, 1997).

No estudo do cobre, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo até parte aérea e a função fisiológica na planta e a produção das plantas (Figura 101).

### 14.2 Absorção, transporte e redistribuição do cobre

#### a) Absorção

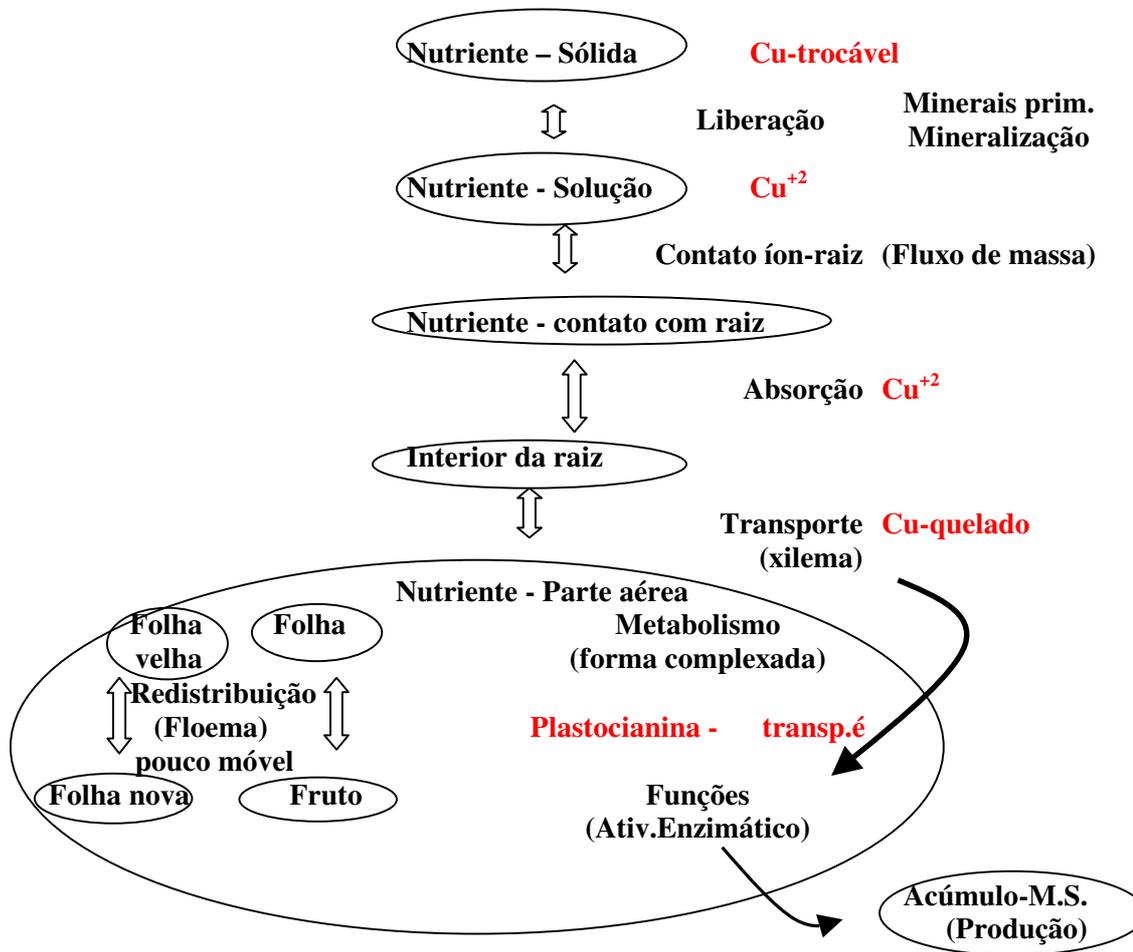
O caminamento do cobre no solo até o local de absorção ocorre devido ao fluxo de massa (95%) (Oliver & Barber, 1966), que no caso do Cu é mais efetivo a pequenas distâncias, e ao passo que as maiores distância ele pode movimentar-se por lixiviação complexado a radicais orgânicos.

O cobre pode ser absorvido na forma iônica  $\text{Cu}^{2+}$  (preferencialmente) e Cu complexado a quelados. No processo de absorção ativa, há competição entre P e Zn pelos mesmos sítios do carregador, e o Mn não interfere.

Podem existir inibições competitivas entre cobre e os nutrientes Zn e Fe (Malavolta et al. (1997). A habilidade que o cobre apresenta em deslocar os íons, principalmente Fe e Zn, dos sítios de troca tem sido apontada como a principal causa desta inibição (Mengel & Kirkby, 1987).

**b) Transporte**

Após a sua absorção, o cobre é transportado via xilema, na forma de Cu-quelado (aminoácidos), pelo processo de transpiração para a parte aérea. No xilema quase todo Cu (>99%) encontra-se na forma de complexo (Marschner, 1995).



**Figura 101.** Dinâmica do cobre no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

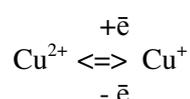
**c) Redistribuição**

O cobre é considerado pouco móvel no floema; portanto, os sintomas de deficiência ocorrem nas folhas mais novas. Entretanto, em situações em que o cobre está elevado no meio, pode haver redistribuição (Cu-quelado) pois tem habilidade para formação de quelatos estáveis de folhas para os frutos. Isso não ocorre quando o cobre encontra-se deficiente no meio.

### 14.3 Participação no metabolismo vegetal

É um elemento de transição similar ao ferro, com facilidade para o transporte de elétrons sendo, portanto, bastante relevante nos processos fisiológicos de oxirredução.

Uma das principais funções do cobre é como ativador ou constituinte de enzimas. A maior parte do Cu está presente nas folhas nos cloroplastos, e mais da metade ligado a plastocianina, que atua especialmente no transporte eletrônico com mudanças de valência, embora outras enzimas também façam este transporte de elétrons e que são ativadas pelo Cu (lacase, oxidase do ácido ascórbico e complexo da oxidase do citocromo). Este fato ocorre pela facilidade do Cu pela mudança de valência:



Entretanto, o transporte eletrônico mediado pelo cobre pode ocorrer sem mudança de valência (oxidase da amina, tirosinase, oxidase da galactose).

Nesta situação de transportador de  $\bar{e}$ , o cobre atua em vários processos metabólicos nos vegetais. Um dos processos vitais afetados pela deficiência de cobre é a fotossíntese, fazendo o transporte eletrônico entre os fotossistemas (I e II), através da plastocianina e em outros sistemas enzimáticos. Na respiração, o Cu junto com o Fe são constituintes da enzima citocromo oxidase (2 átomos de Cu e 2 de Fe), atuando no transporte de elétrons, afetando, assim, a fosforilação oxidativa. E o Cu constitui a enzima ascorbato oxidase, que atua na oxidação do ácido ascórbico para ácido desidroascórbico.

Além disso, o Cu participa também do grupo prostético da dismutase de superóxido, que protege a planta dos efeitos deletérios dos radicais superóxidos ( $\text{O}_2^-$ ). O Cu também ativa as enzimas (polifenol oxidase; oxidase de diamina) que catalisam a oxidação de compostos fenólicos precursores da lignina; portanto, a sua deficiência provoca acúmulo de compostos fenólicos e queda da síntese de lignina, podendo os tecidos como o xilema sofrer colapsos.

Nas leguminosas, o cobre é requerido pelos nódulos e, assim, tem-se um aumento na nodulação e, portanto, a fixação de N. Isto pode ser explicado pelo fato de que, havendo deficiência de Cu, tem-se redução na oferta de carboidratos para a nodulação. Pode ocorrer, ainda, inibição da atividade da polinioxidase, acumulando-se difenóis, com menor produção de melaninas e inibição dos rizóbios. Por fim, o Cu pode reter mais Fe nas raízes e, desse modo, aumentar a produção da leghemoglobina.

Malavolta et al. (1997), apresentou um resumo das enzimas atividades pelo Cu e seus reflexos em diversos processos fisiológicos vitais para os vegetais, conforme consta na Tabela 72.

**Tabela 72.** Enzimas e os processos biológicos afetados pelo Cu nas plantas (Malavolta et al., 1997)

Constituinte/Ativador enzimático	Processos
Oxidase do ascorbato	Fotossíntese
Polifenol oxidase, cresolase, catecolase ou tirosinase	Respiração
Lacase	Relação hormonal
Plastocianina	Fixação de N
Oxidase de diamina	(Indireto)
Oxidase de citocromo	Metabolismo de
Carboxilase de ribulose difosfato	Compostos secundários

Normalmente, as culturas apresentam probabilidade de respostas distintas à aplicação de cobre (Tabela 73), (Lucas & Knezek, 1973 citados por Marinho, 1988).

**Tabela 73.** Probabilidade de resposta de diferentes culturas ao cobre em condições de solo e climas favoráveis à indução de deficiências (Lucas & Knezek, 1973 citados por Marinho, 1988).

Probabilidade de resposta	Culturas
Baixa	Aspargo, feijão, gramíneas forrageiras, ervilha, menta, batata, centeio, soja, arroz
Média	Brocólos, repolho, couve-flor, aipo, trevo, pepino, milho, algodoeiro, rabanete, sorgo, beterraba, tomateiro, nabo, macieira, pessegueiro, pereira, morangueiro
Alta	Alfafa, cevada, cenoura, alface, aveia, espinafre, trigo, citrus, cana-de-açúcar, cafeeiro

#### 14.4. Exigências nutricionais das culturas

O estudo da exigência nutricional das culturas deve refletir a extração total do nutriente do solo, respeitando a extração em cada fase de desenvolvimento da planta, para satisfazer às necessidades nutricionais das culturas, visando à máxima produção econômica.

Salienta-se que o teor total de Cu na planta pode variar de 0,1-0,5% (1-5 g kg<sup>-1</sup>); entretanto, pode atingir 10% (100 g kg<sup>-1</sup>) em folhas velhas. Estes valores podem variar em função da cultura e outros fatores, os quais serão objetos de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente e a marcha de absorção do elemento ao longo do cultivo.

### a) Extração e exportação de nutrientes

A extração total de cobre depende do teor da planta e a quantidade de matéria seca acumulada. Portanto, varia com a produção obtida que, por sua vez, depende da espécie, da variedade/híbrido, da disponibilidade do elemento no solo, do manejo da cultura, entre outros.

A cana-de-açúcar e o milho são as culturas que mais extraem por área o cobre, 270 e 181 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabela 74). As culturas do algodão e do arroz foram as mais exigentes, com 45 e 38 g t<sup>-1</sup> de produto colhido. As culturas que mais exportam cobre com a colheita são o café, a soja e o trigo com 15, 14 e 10 g t<sup>-1</sup>, respectivamente.

### b) Marcha de absorção

Avaliando a marcha de absorção de cobre na soja, verifica-se uma velocidade de absorção baixa no período de 0-30 dias, com 0,2 g/ha/dia, aumentando mais de quatro vezes no período de 30-60 dias, atingindo 0,9 g/ha/dia. No período subsequente, a velocidade máxima de absorção é atingida (1,2 g/ha/dia), e no período de final do ciclo 90-120 dias, existe estabilização com baixa absorção (0,02 g/ha/dia) (Tabela 75). Por estes resultados, verifica-se que, na fase reprodutiva, a exigência da planta é a mais alta. Assim, muitas vezes, os problemas de deficiências de Cu tendem a ocorrer com mais frequência no período reprodutivo das plantas, comparado com o período vegetativo.

Em um estudo de longa duração, com aplicação de Cu em trigo, Brennan (2006) observou-se que a dose de 1,38 kg Cu ha<sup>-1</sup>, foi suficiente para satisfazer a nutrição adequada da cultura (Cu foliar=1,4 mg kg<sup>-1</sup>) durante 28 anos. E neste período a cultura removeu apenas 2 a 3% do Cu aplicado.

**Tabela 74.** Exigências de cobre das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida	Cu acumulado		Cu requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup>
		t ha <sup>-1</sup>	Parte da planta	Total <sup>(3)</sup>	g t <sup>-1</sup>
Anuais					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	2 (1,5) <sup>(2)</sup>		
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	44	59	45
	Raiz	0,5	13		
<b>Soja<sup>(1)</sup></b>	Grãos (vagens)	2,4	34 (14)	64	27
	Caule/ramo/folha	5,6	30		
<b>Milho<sup>(1)</sup></b>	Grãos	6,4	25 (3,9)	181	28,3
	Restos culturais	-	156		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	10 (3,3)		
	Colmos	2	6		
	Folhas	2	5	114	38
	Casca	1	18		
	Raiz	1	75		
<b>Trigo</b>	Grãos	3	30 (10)	40	13
	Palha	3,7	10		
semi-perene/perene					
<b>Cana-de-açúcar</b>	Colmos	100	180 (1,8)	270	2,7
	Folhas	25	90		
<b>Cafeeiro<sup>(1)</sup></b>	Grãos (coco)	2	30 (15)		
	Tronco, ramos e folhas	-	-	-	-

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (g t<sup>-1</sup>): Cu acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Cu da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Cu acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

**Tabela 75.** Marcha de absorção (cumulativa) de cobre no algodoeiro, em solução nutritiva.

Período (dias após a semeadura)	Cu absorvido, g/ha/dia
0-30	0,2
30-60	0,9
60-90	1,2
90-120	0,02

Fonte: Mendes (1965)

## 14.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais de cobre

### a) Deficiência

Os sintomas variam segundo cada espécie e podem não ser tão fáceis de se identificar quanto aos de outros micronutrientes. Uma deficiência moderada, às vezes, causa apenas menor crescimento e redução da colheita, sem sintomatologia característica, enquanto deficiências mais severas podem causar amarelamento (ou coloração verde-azulada) das folhas, estas podem ficar murchas ou com as margens enroladas para cima ou, ainda, ficam maiores que as normais, podendo até ocorrer à morte das regiões de crescimento dos ramos. Salienta-se que a deformação/curvamento dos tecidos vegetais (folhas) é causado pelo fato do papel deste nutriente na lignificação da parede celular, podendo até provocar o tombamento das plantas. Estes sintomas aparecem nos órgãos mais novos das plantas, visto que o Cu pouco se redistribui (Figura 102). As plantas deficientes mostram caules ou colmos fracos e tendência de murchar mesmo quando há umidade suficiente.

Nos cereais, as folhas podem ficar retorcidas, e ainda, maior esterilidade dos grãos de pólen (acúmulo excessivo de auxina), reduzindo a produção de grãos.

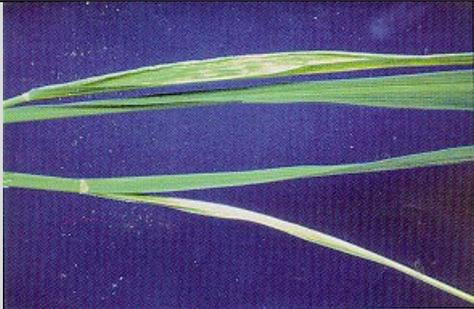
DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA	NUTRIENTE: COBRE
FOTOS	DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
 <p>(a) (b)</p> <p><b>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</b></p>	<p>Manchas verdes ("ilhas") (Foto 1a); folhas eventualmente descoloridas que tornam-se finas como papel e enroladas quando a deficiência é severa; colmos e meristemas perdem a turgidez (doença do "topo caído") e as folhas se curvam e a touceira parece ter sido amassada; perfilhamento reduzido.</p>
 <p>(a) (b)</p> <p><b>Foto 2. MILHO</b></p>	<p>Amarelecimento das folhas novas logo que começam a se desenrolar, depois as pontas se encurvam e mostram necrose, as folhas são amarelas e mostram faixas semelhantes às provocadas pela carência de ferro; as margens são necrosadas (Foto 2a); e as plantas apresentam todas as folhas com aspecto retorcidas (Foto 2b); o colmo é macio e se dobra.</p>
 <p><b>Foto 3. ARROZ</b></p>	<p>As folhas mais novas aparecem azul-esverdeadas, tornando-se cloróticas junto às pontas. A clorose desenvolve-se para baixo, ao longo da nervura principal de ambos os lados, seguida de necrose marrom-escura das pontas. As folhas enrolam-se, mantendo a aparência de agulhas em toda a sua extensão ou, ocasionalmente, na metade da folha, com a base final desenvolvendo-se normalmente.</p>
 <p>(a) (b)</p> <p><b>Foto 4. CAFÉ</b></p>	<p>Em plantas novas as folhas podem se encurvar para baixo a partir da base (Foto 4a). Nas folhas mais novas as nervuras secundárias ficam salientes - "costelas" (Foto 4b). Pode haver deformação do limbo.</p>
<p><b>Foto 4. CAFÉ</b>                  Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>	

Figura 102. Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Cu em diversas culturas.

**b) Excessos**

A toxidez de Cu não é comum; entretanto, durante os estádios iniciais, a redução de crescimento é evidente. A redução do comprimento de raiz é um bom indicador de toxicidade de cobre, sendo que em milho, cultivado em solução nutritiva concentração de Cu de 15,7  $\mu\text{M}$  inibiu o crescimento de raiz (Ali et al., 2002). Assim, no sistema radicular, a toxidez de Cu, causa redução da ramificação, engrossamento, menor crescimento das raízes (danos na permeabilidade das membranas) e, também, pode mostrar deficiência de Fe induzida, aparecimento de manchas necróticas.

No sorgo, a toxicidade de Cu torna o tecido internerval de coloração mais clara, de forma similar à deficiência de Fe, com faixas vermelhas ao longo das margens (Clark, 1993). Isto porque o Cu tem a capacidade para remover das suas posições o Fe, provocando sua deficiência (Mengel & Kirkby, 1987). E ainda, o excesso de Cu pode diminuir o teor de Mn em plantas de couve-flor (Charterjee & Charterjee, 2000). Salienta-se, que há espécies (*Commelina communis*, *Rumex acetosa*) de alta tolerância ao Cu, apresentando alto teor desse elemento (500 a 1000  $\text{mg kg}^{-1}$  MS) sem provocar sintomas (Tang et al., 1999). Enquanto, outras plantas são sensíveis ao Cu, como as rosáceas (macieira, ameixeira etc). O Cu em excesso, inibe o crescimento de plantas e impede importantes processos celulares, como, por exemplo, o transporte de elétrons na fotossíntese (Yruela, 2005) e tem efeito destrutivo na integridade das membranas dos cloroplastos, diminuindo também a fotossíntese (Mocquot et al., 1996).

## Capítulo 15 Molibdênio

### 15.1 Introdução

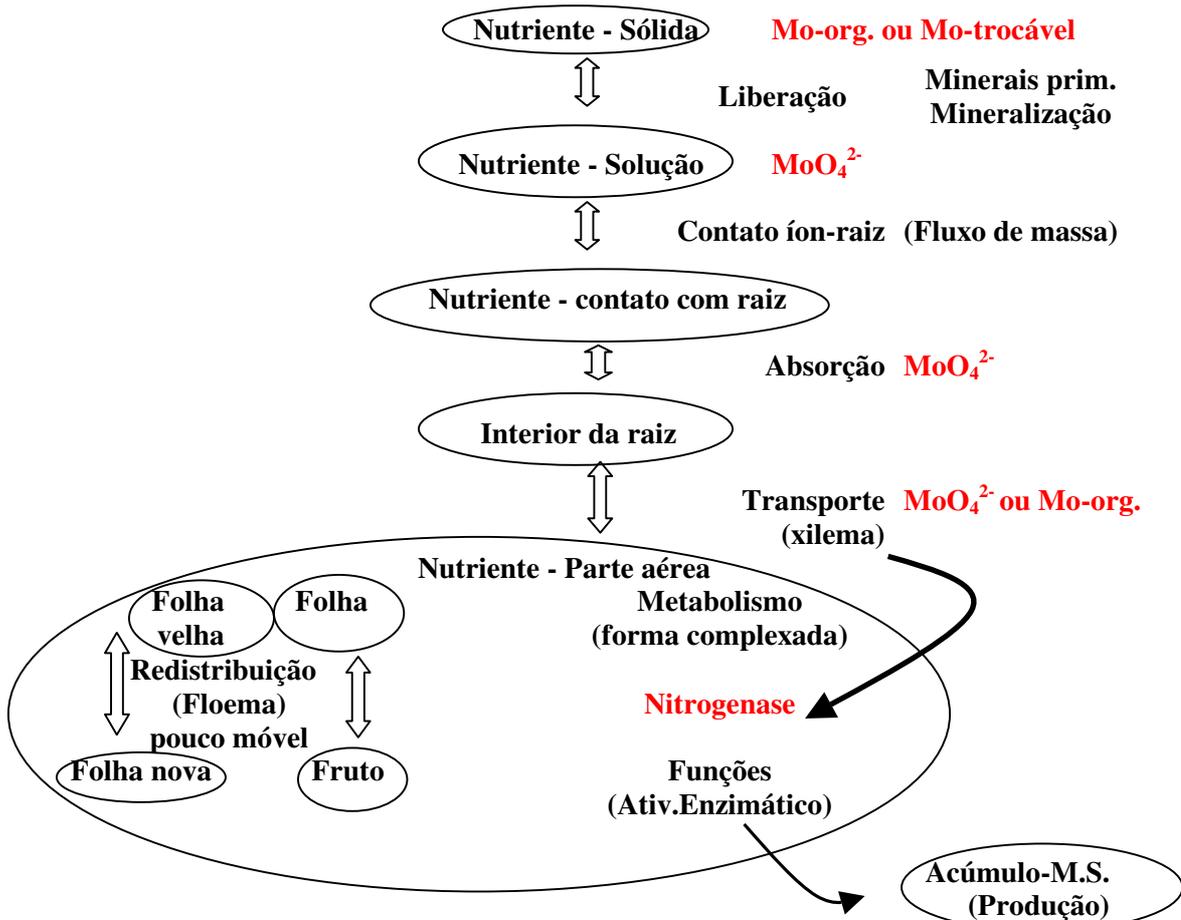
O molibdênio é um metal encontrado no solo, porém como um oxiânion na forma de molibdato  $\text{MoO}_4^{2-}$ , na sua forma de valência mais alta. Suas propriedades são semelhantes às das dos não metais e de outros ânions inorgânicos divalentes. Assim, em solos ácidos, fosfato e molibdato têm comportamento semelhante em relação à forte adsorção aos óxidos hidratados de ferro e, na absorção, o molibdato compete com o sulfato. O molibdato é um ácido fraco, e com decréscimo de pH de 6,5 para abaixo de 4,5, a dissociação diminui, e a formação de poliânions é favorecida. A solubilidade do  $\text{MoO}_4^{2-}$  pode ser estimada da seguinte forma:



Assim, fica evidente o efeito da calagem em solos ácidos para se aumentar a disponibilidade do Mo, estimando-se que é aumentado em cem vezes pela elevação de cada unidade pH.

Devido ao efeito do pH na disponibilidade de Mo, surgiu o termo relação de substituição de calcário por Mo, sendo que para manter a mesma produção da cultura (soja), Quaggio et al. (1998) verificaram que a aplicação do calcário para manter a saturação por bases próxima de 70%, a necessidade de Mo foi de  $25 \text{ g ha}^{-1}$ , ao passo que na saturação por bases de 60%, a necessidade de Mo aumentou para  $50 \text{ g ha}^{-1}$ .

No estudo do molibdênio no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo, raiz e parte aérea (folhas/frutos), ou seja, do solo até na sua incorporação em um composto orgânico ou como um ativador enzimático, que desempenhará funções vitais para possibilitar a máxima acumulação de matéria seca do produto agrícola final (grão, fruta, etc.), (Figura 103).



**Figura 103.** Dinâmica do molibdênio no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

## 15.2 Absorção, transporte e redistribuição do molibdênio

### a) Absorção

O contato Mo-raiz é feito basicamente por fluxo de massa, especialmente em maiores concentrações no solo. Normalmente, o molibdênio é absorvido como  $\text{MoO}_4^{2-}$  quando o pH do meio é igual ou maior que 5,0 e, como  $\text{HMoO}_4^-$  quando o pH é menor que 5,0.

No processo de absorção, a presença de outros íons pode afetar a absorção do Mo sendo que a presença do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  tem efeito sinérgico na absorção do Mo, ao passo que outros nutrientes inibem a sua absorção como  $\text{SO}_4^{2-}$  e outros ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Zn}^{2+}$ ).

## b) Transporte

No xilema, o molibdênio pode ser transportado na forma de  $\text{MoO}_4^{2-}$  (estado de oxidação mais elevado,  $\text{Mo}^{6+}$ ) complexado com os grupos SH de aminoácidos ou com grupos OH de carboidratos e, ainda, outros grupos compostos policarboxilados como ácidos orgânicos.

## c) Redistribuição

De forma geral o Mo é pouco móvel no floema para maioria das espécies. Entretanto, Jongruaysup et al. (1994) verificaram em *Vigna mungo* que a mobilidade de Mo pode variar dependendo do nível de suprimento, apresentando baixa mobilidade em plantas deficientes e alta mobilidade nas plantas bem supridas de Mo.

## 15.3 Participação no metabolismo vegetal

Normalmente, a deficiência de molibdênio pode estar associada de perto com o metabolismo do nitrogênio, em decorrência da exigência de Mo para a atividade da nitrogenase e fixação do N. Além das leguminosas, as crucíferas, são particularmente exigentes em Mo.

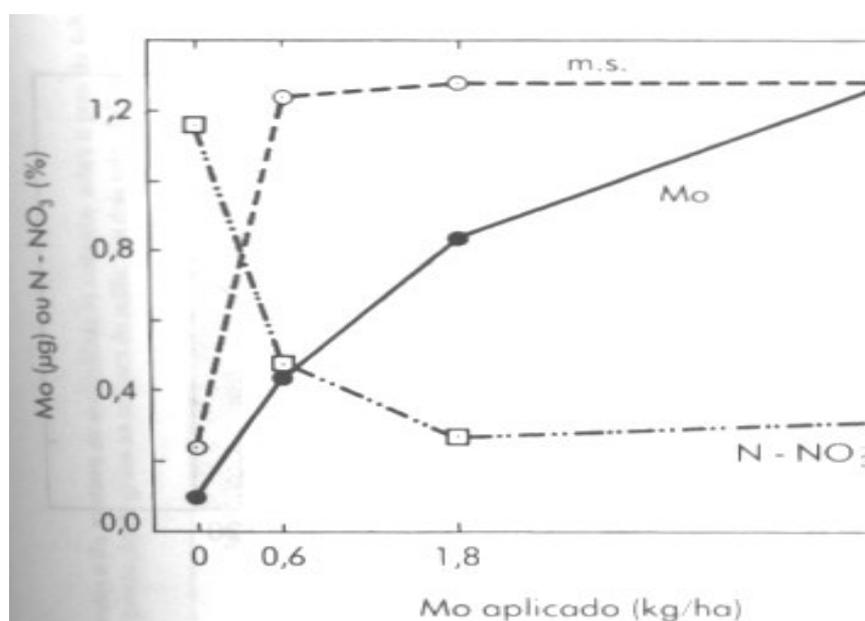
Assim, o molibdênio participa como constituinte de várias enzimas, especialmente as que atuam no metabolismo do nitrogênio e do enxofre, que estão relacionadas com a transferência de elétrons. Com relação ao metabolismo nitrogenado, o Mo afeta a fixação biológica (nitrogenase) e a redução do nitrato e nitrito (redutases). Com relação a redutase do nitrato, a mesma contém três subunidades: a FAD (flavina), a hemo (citocromo) e a unidade com Mo. Assim, durante a redução do nitrato, os elétrons são transferidos diretamente do Mo para o nitrato. O Mo também está envolvido no metabolismo do enxofre (redutase de sulfito) em reações de oxirredução. Além disso, tem efeito significativo na formação do pólen.

Quanto a nitrogenase, este sistema enzimático catalisa a redução do  $\text{N}_2$  atmosférico a  $\text{NH}_3$ , reação pela qual o *Rhizobium* dos nódulos radiculares supre nitrogênio à planta hospedeira. Por esta razão, leguminosas deficientes em Mo, freqüentemente, apresentam sintomas de deficiência de nitrogênio. A nitrogenase, conforme dito no capítulo do nitrogênio, é formado pelos complexos Fe-proteína e Fe-Mo-proteína, sendo que esta última contém como cofator os íons molibdênio e ferro, ambos necessários para a ativação da enzima.

O molibdênio é necessário para as plantas quando o N é absorvido na forma de  $\text{NO}_3^-$ , porque é componente da enzima redutase do nitrato. Esta enzima catalisa a redução biológica do  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NO}_2^-$ , que é o primeiro passo para a incorporação do N como  $\text{NH}_2$  em proteínas.

O Mo é essencial a enzima xantina desidrogenase que atua na conversão de xantina em ácido úrico, durante o catabolismo das purinas (adenina e guanina). E também, faz parte da oxidase responsável pela síntese do ácido abscísico (Marengo & Lopes, 2005).

Neste sentido, Brown & Clark (1974) verificaram os efeitos benéficos do Mo na diminuição do acúmulo de nitrato e com reflexos positivos na produção de matéria seca de plantas de milho (Figura 104).



**Figura 104.** Produção de matéria seca e conteúdo de Mo e N nítrico em plantas de milho aos 18 dias após a germinação, cultivado sob diferentes níveis de Mo no solo.

A maior eficiência da fixação simbiótica do  $\text{N}_2$  pelo amendoim tem ocorrido com a aplicação de molibdênio (Hafner et al., 1992).

#### 15.4. Exigências nutricionais das culturas

O nível ótimo de Mo nas plantas é muito pequeno, próximo de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ . Este valor pode variar em função da cultura e outros fatores, os quais serão objetos de um capítulo (*Diagnose foliar*).

Entretanto, o nível crítico de Mo nos nódulos das leguminosas é cerca de 10 vezes superior ao das folhas, devido à sua alta exigência.

## a) Extração e exportação de nutrientes

O teor de molibdênio nos tecidos vegetais é muito baixo, sendo o menor dentre todos os nutrientes, de forma que a exigência das plantas também é baixa. Quanto à extração por área, a soja é a que mais extrai Mo ( $13 \text{ g ha}^{-1}$ ), enquanto a exigência por tonelada de produtos colhidos tem-se que a soja e o algodão são os mais exigentes, 5,4 e  $1,1 \text{ g t}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 76).

**Tabela 76.** Exigências de molibdênio das principais culturas (Malavolta et al., 1997)

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida $\text{t ha}^{-1}$	Mo acumulado		Mo requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup> $\text{g t}^{-1}$
			Parte da planta	Total <sup>(3)</sup> $\text{g ha}^{-1}$	
<b>Anuais</b>					
<b>Algodoeiro</b>	Reprodutiva (algodão/caroço)	1,3	0,2(0,15) <sup>(2)</sup>		1,1
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	1,0	1,4	
	Raiz	0,5	0,2		
<b>Soja</b>	Grãos (vagens)	2,4	11 (4,5)		5,4
	Caule/ramo/folha	5,6	2	13	
<b>Milho</b> <sup>(1)</sup>	Grãos	6,4	2,5 (0,39)		0,6
	Restos culturais	-	1,5	4,0	
<b>Arroz</b>	Grãos	3	0,3 (0,1)		0,5
	Colmos	2	0,1		
	Folhas	2	0,3	1,4	
	Casca	1	0,4		
	Raiz	1	0,3		
<b>semi-perene/perene</b>					
<b>Cana-de-açúcar</b> <sup>(1)</sup>	Colmos	100	2 (0,02)		-
	Folhas	25	-		
<b>Cafeeiro</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (coco)	2	0,5 (0,25)		-
	Tronco, ramos e folhas	-	-		

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos ( $\text{g t}^{-1}$ ): Mo acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Mo da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Mo acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

A soja também é a cultura que mais exporta o molibdênio ( $4,5 \text{ g t}^{-1}$ ).

Como a exigência das plantas é pequena, as recomendações de aplicação de Mo em leguminosas, como a soja, indicam aplicações via semente ( $30 \text{ a } 60 \text{ g ha}^{-1}$ ) ou foliar ( $1\text{-}2 \text{ kg ha}^{-1}$ ) que já são suficientes para a cultura.

Quanto à aplicação via semente, dados de pesquisa tem mostrado que a nutrição adequada em Mo na planta-mãe, em campos de semente traz os maiores benefícios na nodulação e na produção, com doses menores próximas de  $20 \text{ g Mo ha}^{-1}$  (Tabela 77).

### b) Marcha de absorção

Normalmente na soja, a marcha de absorção de molibdênio inicia-se lenta até os 30 dias, mantendo-se alta após esse período com máximo aos 60-90 dias. Entretanto, diferentemente dos outros micronutrientes, a absorção do Mo na fase reprodutiva (final) dos 90-120, mantém-se alta, provavelmente para atender à alta atividade do sistema nitrogenase nesta fase do ciclo de vida da planta (Tabela 78).

**Tabela 77.** Efeito do uso de sementes de soja (BR 37), com diferentes teores de Mo e níveis de Mo, aplicados na semente, no número e na massa de nódulos secos e no rendimento de grãos.

Tratamentos	Nodulação (10 plantas)		Produção $\text{kg ha}^{-1}$
	Número	Massa seca (mg)	
Semente rica Mo + $0 \text{ g Mo ha}^{-1}$	230	350	3378
Semente rica Mo + $10 \text{ g Mo ha}^{-1}$	240	430	3508
Semente rica Mo + $20 \text{ g Mo ha}^{-1}$	210	330	3641
Semente rica Mo + $40 \text{ g Mo ha}^{-1}$	200	350	3102
<b>Média semente rica em Mo</b>	<b>220</b>	<b>365</b>	<b>3407</b>
Semente médio Mo + $0 \text{ g Mo ha}^{-1}$	190	280	3049
Semente médio Mo + $10 \text{ g Mo ha}^{-1}$	180	230	3217
Semente médio Mo + $20 \text{ g Mo ha}^{-1}$	190	240	3045
Semente médio Mo + $40 \text{ g Mo ha}^{-1}$	180	310	3306
<b>Média semente média em Mo</b>	<b>185</b>	<b>265</b>	<b>3154</b>
Semente pobre Mo + $0 \text{ g Mo ha}^{-1}$	200	260	2766
Semente pobre Mo + $10 \text{ g Mo ha}^{-1}$	200	280	3075
Semente pobre Mo + $20 \text{ g Mo ha}^{-1}$	170	230	3020
Semente pobre Mo + $40 \text{ g Mo ha}^{-1}$	180	290	3129
<b>Média semente pobre em Mo</b>	<b>188</b>	<b>265</b>	<b>2998</b>
DMS 5%	25,3	58,3	262

**Tabela 78.** Marcha de absorção (cumulativa) de molibdênio na soja (cv. Santa Rosa) em solução nutritiva (Bataglia & Mascarenhas, 1977).

Período (dias após a semeadura)	Mo absorvido, g/ha/dia
0-30	0,01
30-60	0,17
60-90	0,24
90-120	0,23

## 15.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais de molibdênio

### a) Deficiência

Devido à restrita mobilidade nas plantas, os sintomas de deficiência de Mo descritos em algumas espécies ocorrem em folhas novas e em outras em folhas velhas. Em geral, ocorre uma clorose internerval, semelhante à deficiência de Mn, em que as margens das folhas tendem a curvar-se para cima ou para baixo (Figura 105).

Nas leguminosas, é comum o sintoma característico de deficiência de N (clorose uniforme nas folhas velhas, que podem evoluir para necrose). Pode ocorrer à murcha das margens das folhas novas e encurvamento do limbo para cima (tomateiro) ou para baixo (cafeeiro). É comum em brássicas, o “rabo de chicote”, que consiste em folhas novas que crescem quase desprovidas de limbo, crescendo apenas a nervura principal.

É pertinente salientar que a deficiência de Mo tem maior chance de ocorrer em plantas que receberam N na forma de nitrato e não de amônio, uma vez que o nitrato na planta necessita ser reduzido (por enzimas ativadas por Mo) e o amônio não.

### b) Excessos

A toxicidade de molibdênio em culturas não é comum sendo encontrada apenas quando se verificam teores muito altos. Entretanto, Gris et al. (2005), verificaram que altas concentrações de molibdato de amônio ( $160 \text{ g ha}^{-1}$ ), via foliar, na soja cultivado em plantio direto, podem ter provocado efeito tóxico às plantas, apresentando, portanto, produção menor do que a testemunha.

Deve-se considerar que a toxicidade de Mo pode resultar em clorose internerval das folhas, semelhante à deficiência de Fe, e as folhas novas podem ficar distorcidas.

No sorgo, os sintomas aparecem como uma coloração violeta-escura na lâmina inteira, podendo ser distinguidos dos sintomas de deficiência de P, que resultam em folhas verde-escuras com superposição de manchas de coloração vermelho-escura (Clark, 1993).

Salienta-se, que as plantas podem apresentar maior tolerância que os animais ao excesso de Mo. Assim, forrageiras com alto teor de Mo (5 a 10 mg kg<sup>-1</sup>) pode causar toxidez (molibdenose) em ruminantes (Padra et al., 1998).

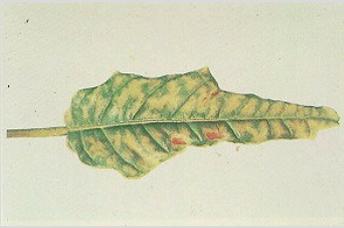
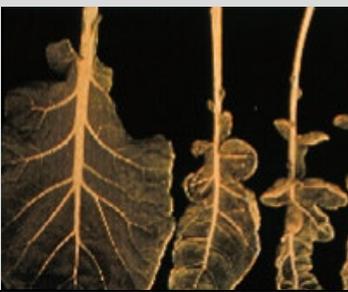
DESORDEM NUTRICIONAL: DEFICIÊNCIA	NUTRIENTE: MOLIBDÊNIO
FOTOS	DESCRIÇÃO DOS SINTOMAS
	<p>Molibdênio: Pequenas estrias cloróticas longitudinais começando no terço apical da folha; folhas mais velhas secam prematuramente do meio para as pontas.</p>
<p>Foto 1. CANA-DE-AÇÚCAR</p>	
	<p>Deficiência de N, induzida inicialmente por deficiência de Mo (em solo ácido = baixa disponibilidade de Mo). Obs. A deficiência de Mo induz a deficiência de N, por dois motivos: * o Mo faz parte de enzimas responsáveis pela incorporação do N nos esqueletos orgânicos nos tecidos e também, no caso de leguminosas, é necessário para redução do N atmosférico para formas assimiláveis para planta.</p>
<p>Foto 2. SOJA</p>	
	<p>Desaparecimento da clorofila em manchas distribuídas ao acaso no limbo; as manchas desenvolvem centros pardos com halos amarelos ou alaranjados, podendo coalescer ou sobrepor-se; as manchas têm 0,6-1,25 mm de diâmetro e aparecem somente no outono.</p>
<p>Foto 3. CITRUS</p>	
	<p>Molibdênio: nas folhas mais velhas aparecem manchas amareladas e depois pardas entre as nervuras. Com o tempo, essas folhas se enrolam para baixo ao longo da nervura principal e os bordos opostos chegam a se tocar. A principal causa de deficiência é a acidez do solo.</p>
<p>Foto 4. CAFÉ</p>	
	<p>Em hortaliças, as folhas novas ficam deformadas, tais como “ponta de chicote”.</p>
<p>Foto 5. BRÁSSICA</p>	
<p>Fonte: Prado (não publicado); Malavolta et al. (1989)</p>	

Figura 105. Fotos e a descrição geral dos sintomas visuais de deficiência de Mo em diversas culturas.

## Capítulo 16 Cloro

### 16.1 Introdução

O cloro não é fixado pela matéria orgânica do solo ou pelas argilas é facilmente lixiviado, sendo um dos primeiros elementos removidos dos minerais pelos processos de intemperização (acumulando-se nos mares).

O cloro, junto com o Mo, tem sua disponibilidade aumentada no solo com o aumento do valor pH.

No Brasil, normalmente, não se tem observado problema de deficiência de cloro, uma vez que a fonte de potássio comumente utilizada (cloreto de potássio) (fonte de menor custo), traz junto o cloro. Assim, o cloro de um lado é adicionado aos sistemas de produção em significativas quantidades via fertilizantes, reserva do solo, chuva, entre outros, sendo também altamente lixiviado no solo devido à sua alta solubilidade. Portanto, a dinâmica do cloro nos sistemas de produção é alta, e raramente tem-se deficiência, podendo ocorrer sim toxidez em determinadas situações, mas com raridade também devido à alta tolerância das plantas a altos teores de Cl no tecido.

Altos níveis de cloro estão associados a solos sódicos, alcalinos ou salinos encontrados em regiões áridas do Nordeste brasileiro.

No estudo do cloro no sistema planta, é importante conhecer todos os “compartimentos” que o nutriente percorre desde a solução do solo, raiz e parte aérea (folhas/frutos) (Figura 106).

### 16.2 Absorção, transporte e redistribuição do cloro

#### a) Absorção

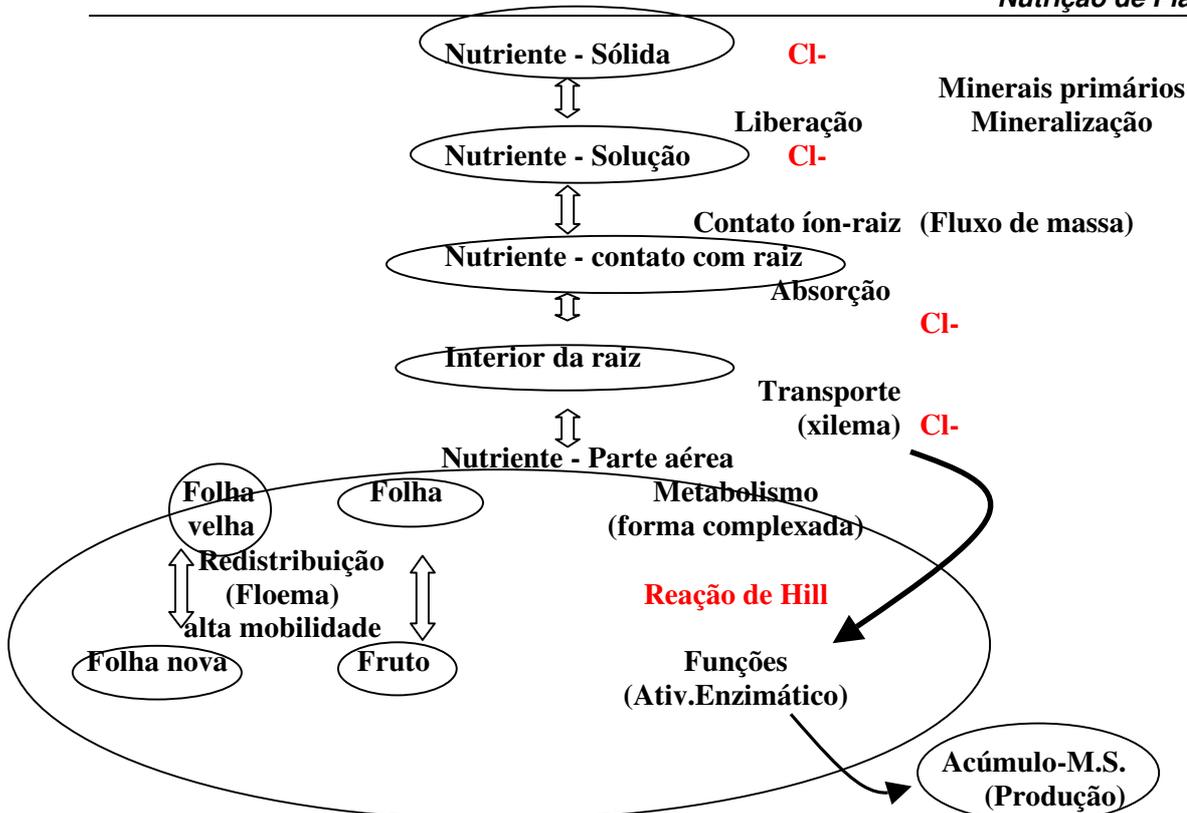
As plantas absorvem o cloro na forma  $\text{Cl}^-$ , ativamente. A sua absorção pode ser inibida competitivamente por  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ .

#### b) Transporte

O cloro tem alta mobilidade no xilema, na mesma forma absorvida ( $\text{Cl}^-$ ).

#### c) Redistribuição

A sua mobilidade dentro da planta em geral, é considerado alta e a sua redistribuição das folhas maduras para os pontos de maior exigência não sofre limitação.

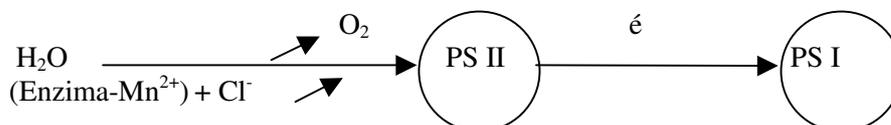


**Figura 106.** Dinâmica do cloro no sistema solo-planta, indicando os processos de passagem do nutriente nos diferentes compartimentos da planta.

### 16.3 Participação no metabolismo vegetal

Dentre os micronutrientes, o cloro é o mais exigido, apresentando alto teor nas plantas. Em geral, a maior parte do cloro nas plantas não está ligado com a constituição de compostos orgânicos. Entretanto, existem alguns compostos que contêm Cl, como ácido cloroindol acético (Engvild, 1986). Assim, sua principal função seria enzimática como co-fator de enzima que atua na fotólise da água (fotossíntese) e outras enzimas como as ATPases do tonoplasto e também efeitos osmóticos no mecanismo de abertura e fechamento de estômatos e balanço de cargas elétricas. Embora a necessidade da planta em Cl seja maior para satisfazer a esta última função citada. No vacúolo, o teor de Cl é cerca de 3 vezes superior do citoplasma.

Assim, a principal função do Cl nas plantas é a participação na reação de Hill em cloroplastos, como co-fator do complexo enzimático (Enzima-Mn) a partir do desdobramento da molécula de água na fotossíntese II, sendo esquematizado da seguinte forma:



O cloro atua na regulação da pressão osmótica da célula, sendo que o acúmulo deste elemento no interior da célula diminui o potencial da água ficando menor que o meio externo, dessa forma, tem-se gradiente de potencial da água que favorece a entrada dela na célula, e assim tem-se hidratação dos tecidos (turgescência) e a abertura dos estômatos. Além do  $\text{Cl}^-$ , a abertura/fechamento dos estômatos são regulados pelo fluxo de K, acompanhado pelo malato. Portanto, o  $\text{Cl}^-$  atua como contra-ânion do  $\text{K}^+$ , fazendo a osmorregulação. Logo, o efeito do  $\text{Cl}^-$  na abertura/fechamento dos estômatos pode afetar novamente fotossíntese pelo fluxo de  $\text{CO}_2$ .

Existem outros efeitos do cloro nas plantas; entretanto, há necessidade de mais estudos sobre a participação do elemento em processos metabólicos. Estudos recentes indicam o  $\text{Cl}^-$  nos seguintes processos:

- estímulo na ATPase (mantém pH citoplasma  $>7$ ), localizada no tonoplasto;
- inibição da síntese ou degradação de proteínas, visto que em plantas deficientes em  $\text{Cl}^-$ , tem-se aumento de aminoácidos e amidas;
- estímulo na síntese de asparagina (sintetase da asparagina) e ativando outras enzimas (ATPases; pirofosfatases, atuam no metabolismo do N.

Por fim, o cloro tem sido associado também à redução de certas doenças das plantas (podridão de raiz).

#### 16.4. Exigências nutricionais das culturas

A concentração de cloro nas plantas é alta (mais ou menos equivalente à dos macronutrientes), atingindo até  $20000 \text{ mg kg}^{-1}$ ; entretanto, é considerado micronutriente, porque a exigência da planta é bem menor, com ótimo crescimento das plantas, o teor é de  $340\text{-}1000 \text{ mg kg}^{-1}$ . Nota-se, pois, que ao contrário do boro, os níveis de deficiência e toxidez de cloro são bem largos.

Assim, para a discussão adequada da exigência nutricional das culturas, dois fatores são igualmente importantes: a extração total/exportação do nutriente e a marcha de absorção ao longo do cultivo.

##### a) Extração e exportação de nutrientes

Os dados de pesquisa que tratam da exigência de cloro são restritos, existindo em apenas algumas culturas, assim como os estudos sobre a marcha de absorção.

A extração de cloro pelas culturas variou de 1,2 a 36 kg ha<sup>-1</sup>, tendo o milho a maior extração. Logo, o milho também apresentou a maior exigência com 5,6 kg t<sup>-1</sup> de grãos produzidos e exportando 313 g t<sup>-1</sup> de grãos (Tabela 79).

**Tabela 79.** Exigências de cloro das principais culturas (Malavolta et al., 1997).

Cultura	Parte da planta	Matéria seca produzida t ha <sup>-1</sup>	Cl acumulado da planta g ha <sup>-1</sup>	Cl requerido para produção de 1 t de grãos <sup>(4)</sup> g t <sup>-1</sup>	Total <sup>(3)</sup>
<b>Soja</b> <sup>(1)</sup>	Grãos (vagens)	2,4	568 (237) <sup>(2)</sup>	499	1197
	Caule/ramo/folha	5,6	629		
<b>Milho</b> <sup>(1)</sup>	Grãos	6,4	2000 (313)	5625	36000
	Restos culturais	-	34000		
<b>Arroz</b>	Grãos	3	0,4 (0,13)	504	1512
	Colmos	2	8		
	Folhas	2	3		
	Casca	1	0,5		
	Raiz	1	1500		

<sup>(1)</sup> Malavolta (1980); <sup>(2)</sup> Exportação relativa de nutrientes através dos grãos produzidos (g t<sup>-1</sup>); Cl acumulado nos grãos/matéria seca dos grãos; <sup>(3)</sup> Sugere a exigência nutricional (total) por área da cultura para o respectivo nível de produtividade; <sup>(4)</sup> Sugere a exigência nutricional relativa de Cl da cultura para produção de uma tonelada do produto comercial (grãos/colmos); obtido pela fórmula: Cl acumulado na planta (parte vegetativa+reprodutiva)/matéria seca do produto comercial.

Avaliando a marcha de absorção de cloro pela cultura da soja, observa-se uma absorção muito lenta nos primeiros 30 dias, sendo que no período de 30-60 dias, ocorreu a maior taxa de absorção, permanecendo neste nível até o final do ciclo da cultura (Tabela 80).

**Tabela 80.** Marcha de absorção (cumulativa) de cloro na soja (cv. Santa Rosa) em solução nutritiva (Bataglia & Mascarenhas, 1977).

Período (dias após a semeadura)	Cl absorvido, g/ha/dia
0-30	2,2
30-60	17,4
60-90	14,9
90-120	17,2

## 16.5. Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais de cloro

### a) Deficiência

Dependendo da planta, os sintomas de deficiência aparecem primeiro nas folhas mais velhas (tomateiro, alface, repolho, beterraba) ou nas mais novas (milho, abobrinha): murchamento, clorose, bronzeamento e deformação da folha que toma aspecto de taça “cupping”. As raízes também se desenvolvem menos, ficando grossas e sem as laterais.

Em cana-de-açúcar, pode ocorrer aparecimento de raízes curtas e com poucas ramificações laterais. Em fumo, a deficiência de  $\text{Cl}^-$  diminui a combustão das folhas.

Salienta-se que tais deficiências de Cl não têm ocorrido nas plantas no campo, visto que a fonte de potássio (KCl) tem como acompanhante o Cl e ainda a água da chuva apresenta o elemento. Acrescenta-se, que o nível crítico de deficiência de Cl é baixo ( $1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e assim doses entre 4 a  $8 \text{ kg ha}^{-1}$  de Cl seria suficiente para atender a necessidade nutricional das culturas (Marschner, 1995).

### b) Excessos

As culturas normalmente apresentam certa tolerância a altas concentrações de Cl, apresentando grandes diferenças genotípicas. Marschner (1995), indicam que a toxidez de Cl pode ser atingida com teores de  $3500 \text{ mg kg}^{-1}$  ( $\sim 10 \text{ mM}$  no extrato foliar fresco) (maioria das frutérias, algodoeiro, feijoeiro) ou de 20000 a  $30000 \text{ mg kg}^{-1}$  em plantas de cevada, espinafre e alface. Sendo que as plantas halófitas são conhecidas por apresentar alto teor do presente elemento em seus tecidos, e são plantas que desenvolveram diferentes mecanismos de tolerância a salinidade (formação de barreiras ao transporte do Cl e Na; eliminação dos sais através dos pêlos; abscisão de folhas velhas com alto teor de sais e compartimentalização do sal nos vacúolos). Assim, muitas das vezes as plantas podem absorver dezenas de vezes a quantidade normalmente requerida, sendo portanto, um exemplo típico de consumo de luxo. Entretanto, quando se aumenta ainda mais a concentração do elemento na solução do solo, as membranas perdem a seletividade aumentando a absorção do íon pela cultura. Salienta-se, que em plantas de soja sensíveis (Paraná) acumulam grande quantidade do elemento ( $30.000 \text{ mg kg}^{-1}$ ), enquanto as tolerantes, com mecanismos de exclusão de Cl, apresentam teores foliares bem menores ( $1000\text{-}2000 \text{ mg Cl}$  por kg de matéria seca). Em cafeeiros submetidos à aplicação de cloreto de potássio ( $400 \text{ g}$  por planta), ocorrem altos teores de Cl ( $5149 \text{ mg kg}^{-1}$ ),

quando comparado à planta controle ( $433 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cl), que mesmo assim não demonstram sintomas de toxidez (Catani et al., 1969, citados por Mello, 1983). Da mesma forma ocorre com a bananeira, em que os teores de Cl atingem em média  $9200\text{-}9900 \text{ mg kg}^{-1}$  (Gallo et al., 1973, citado por Mello, 1983). Nota-se que plantas exigentes em K, como cafeeiro e bananeira, acumulam altos teores de Cl, uma vez que a fonte mais comum (menor custo) é o cloreto de potássio. Apesar de estas culturas não apresentarem sintomas de toxidez que prejudique a produção agrícola, o excesso de Cl, pode influenciar a qualidade destes produtos. Assim, é importante que haja, linhas de pesquisas que avaliem os efeitos de altos teores de Cl na qualidade dos produtos agrícolas.

Os sintomas de toxicidade de cloro na cana-de-açúcar ocorrem de forma semelhante à deficiência, ou seja, o aparecimento de raízes anormais, com poucas ramificações.

O efeito da toxidez de Cl<sup>-</sup> pode, às vezes, ser diminuído pela presença de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  no substrato. Entretanto, Silva et al. (2003) observaram que o cálcio suplementar não minorou os efeitos inibitórios do estresse induzido por NaCl.

## Capítulo 17 Diagnose visual e foliar

### 17.1 Introdução

Para que uma cultura qualquer possa manifestar todo o seu potencial genético por meio da produção de um alimento qualquer, é necessário que tenha à sua disposição todos os fatores vitais otimizados (climáticos, genótipos, edáficos, luz, água, temperatura, nutrientes etc.).

No tocante à nutrição, é necessário que a planta tenha a seu dispor durante todo o seu ciclo vital, os nutrientes em quantidades adequadas para que possam cumprir as suas funções no metabolismo vegetal.

Salienta-se que dos fatores que determinam o lucro do empreendimento agrícola, ou seja, preço do produto, custo de produção e produtividade, o último é o principal que, por sua vez é, na maior parte, explicada pelo estado nutricional adequado da cultura. É necessário então saber se a planta ou a cultura está ou não bem-nutrida, pois é do adequado estado nutricional que depende a produção de uma cultura qualquer.

Portanto, para otimizar a nutrição da planta, prevenindo insucessos devido a deficiências ou excessos de elementos, deve-se empregar a análise de solos como critério para recomendação de corretivos e fertilizantes e, também, a própria planta como objeto de diagnóstico. Assim, a avaliação do estado nutricional das plantas pode ser feito utilizando-se a análise química do solo e de planta (folhas).

No caso da planta, tem-se o diagnóstico foliar, tendo dois caminhos que podem auxiliar neste sentido, ou seja, pode-se lançar mão de sintomas visuais e de análises químicas do material vegetal.

#### a) Diagnose visual

Para usar o diagnóstico pelo método visual, é preciso garantir que o problema no campo é causado pela deficiência ou pelo excesso, pois a incidência de pragas e doenças, entre outros, podem “mascarar” pelo fato de gerar sintomas parecidos com um nutricional. Assim, nos casos de desordem nutricional, os sintomas apresentam as seguintes características:

**Dispersão** – o “problema nutricional” ocorre de forma homogênea no campo, pois em casos de doenças/pragas, por exemplo, estes ocorrem em plantas isoladas ou em “reboleiras”.

**Simetria** – em um par de folhas, a desordem nutricional ocorre nas duas folhas.

**Gradiente** – em um ramo ou planta, os sintomas respeitam um gradiente, apresentando um agravamento dos sintomas nas folhas velhas para as novas ou vice-versa.

Assim, na diagnose visual, a sintomatologia de deficiência/excesso podem variar com as culturas. Normalmente, a sintomatologia de deficiência ocorre em folhas velhas (para os nutrientes móveis na planta) ou novas ou em brotos (para os nutrientes pouco móveis na planta), a ainda pode ser visualizada na raiz, caracterizando diferentes tipos de sintomas (Figura 107). Assim, conforme visto no final de cada capítulo, os sintomas visuais de deficiência nutricional podem ser agrupados em seis categorias: a) crescimento reduzido; b) clorose uniforme ou em manchas nas folhas; c) clorose internerval; d) necrose. e) coloração purpúreo; f) deformações.

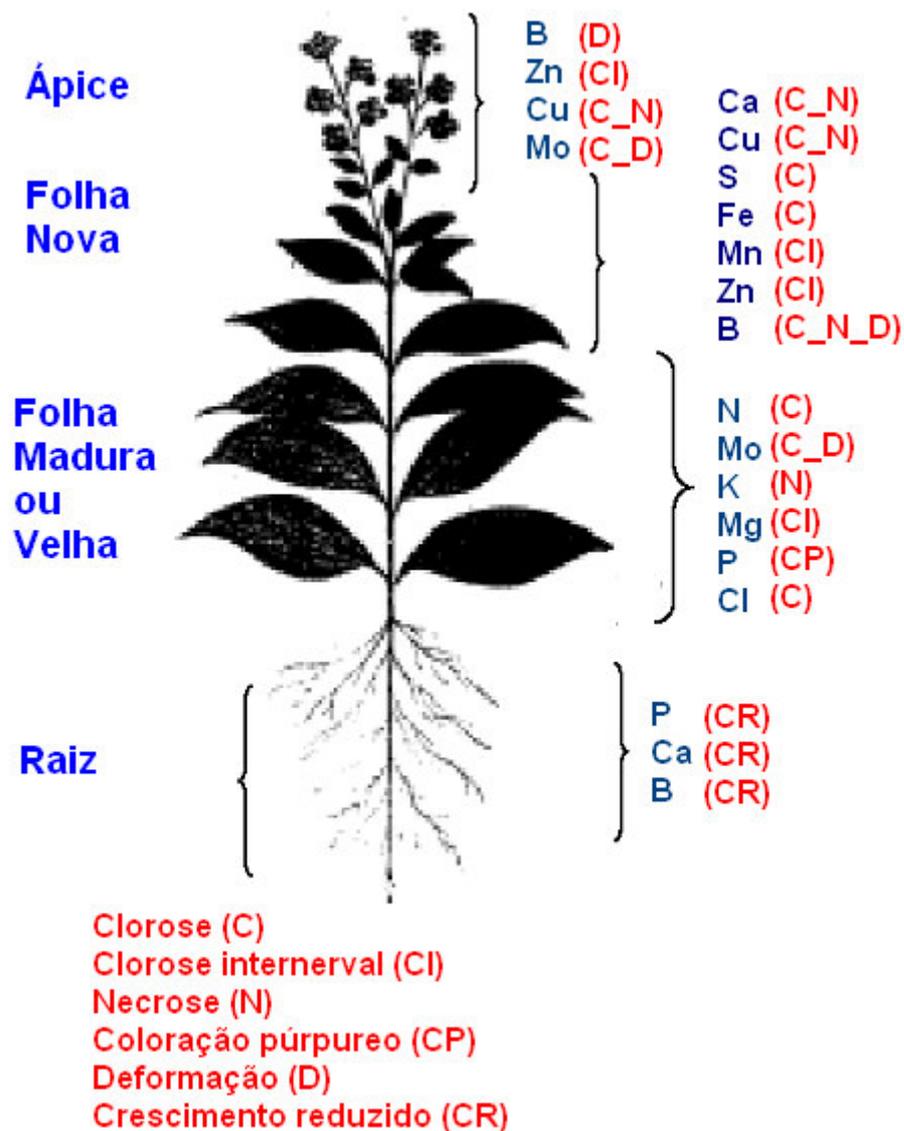


Figura 107. Esquema de uma chave de sintomatologia de desordem nutricional por deficiência.

A diagnose visual permite avaliar os sintomas de deficiência ou excesso de nutrientes, sendo possível fazer correções no programa de adubação, com certas limitações. Entretanto, este método recebe críticas por uma série de limitações:

- \* No campo, a planta é passível de sofrer interferências de agentes (pragas e patógenos) que podem mascarar a exatidão da detecção do nutriente-problema, conforme dito anteriormente.

- \* O sintoma de deficiência de certo elemento pode diferir em diferentes culturas, ou seja, o conhecimento do sintoma de deficiência em uma dada espécie pode não ser válido para outra.

- \* Podem ocorrer sintomas de deficiência iguais para um nutriente diferente.

- \* Pode ocorrer um nível de deficiência que irá reduzir a produção sem que a planta desenvolva qualquer sintoma.

- \* A deficiência de dois ou mais nutrientes simultaneamente impossibilita a identificação dos nutrientes em deficiência.

- \* Uma condição de excesso de um dado nutriente pode ser confundida com deficiência de um outro nutriente.

- \* Além disso, a diagnose visual não quantifica o nível de deficiência ou de excesso do nutriente em estudo.

Cabe salientar que somente quando a planta apresenta uma desordem nutricional aguda, é que ocorre claramente a manifestação dos sintomas visuais de deficiência ou excesso característicos, passíveis de diferenciação; entretanto, neste ponto, parte significativa da produção (cerca de 40-50%) já está comprometida. Portanto, o uso da diagnose visual não deve ser a regra e, sim, como um complemento da diagnose. Devido a estas limitações da diagnose visual, a mesma deverá ter maior sucesso apenas com os técnicos com significativa experiência na cultura da sua região.

#### **b) Diagnose foliar**

Assim, um método de diagnose com menor grau de limitação que a diagnose visual, é a diagnose foliar por meio da análise química das folhas de forma que passa a ser um método mais utilizado no monitoramento do estado nutricional das culturas. O uso do teor de nutrientes nas plantas para indicar o estado nutricional das plantas foi inicialmente proposta na década de 30, pelo Lagatu & Maume (1934).

Embora a técnica da análise química de plantas ser relativamente antiga, ainda, hoje é pouco utilizada pelos agricultores brasileiros.

A diagnose foliar propriamente dita, consiste na avaliação do estado nutricional de uma planta tomando uma amostra de um tecido vegetal e comparando-a com seu padrão preestabelecido. Este padrão consiste em uma planta que apresenta todos os nutrientes em proporções adequadas, capazes de propiciar condições favoráveis para a planta expressar seu máximo potencial genético para a produção.

As folhas constituem o tecido vegetal mais comumente empregado para a análise, pois este órgão é a sede do metabolismo da planta. Embora podem ser utilizados outros tecidos vegetais, como parte da folha (pecíolo) ou mesmo a semente conforme indicaram Rafique et al. (2006) entre outros.

A análise química foliar, pode ser interpretada tomando-se um único nutriente, por meio do método do nível crítico ou da faixa de suficiência ou alternativamente, tomando como base a relação entre os nutrientes feita pelo método denominado DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação). Assim, existem várias ferramentas que podem ser utilizadas, preferencialmente, de maneira integrada para o conhecimento do sistema solo-planta, com subsídios suficientes para a interferência, se for o caso, na adoção de práticas de adubação, inclusive tornando-a mais eficiente.

A diagnose foliar serve para identificar o estado nutricional da planta, pela análise química de um tecido vegetal que seja mais sensível em demonstrar as variações dos nutrientes, e que seja o centro das atividades fisiológicas da planta, ou seja, na maioria das vezes, a folha. A utilização da análise foliar como critério diagnóstico baseia-se na premissa de existir relação entre o suprimento de nutrientes, e os níveis dos elementos foliares e que aumentos ou decréscimos nas concentrações relacionam-se com produções mais altas ou mais baixas,. O teor de nutriente dentro da planta é um valor integral de todos os fatores que interagiram para afetá-lo. Para fins de interpretação dos resultados de análise química de plantas, é preciso conhecer os fatores que afetam a concentração de nutrientes, os procedimentos padronizados de amostragem e as relações pertinentes (premissas básicas para o uso da diagnose foliar):

- a) suprimento do nutriente pelo solo x produção. Isto quer dizer que em um solo mais fértil a produção deverá ser maior que um solo de baixa fertilidade;
- b) suprimento do nutriente pelo solo x teor foliar. Com o aumento do suprimento do nutriente no solo, aumenta-se também, o teor na folha das plantas;

c) teor foliar x produção. O aumento do nutriente na folha é que explicaria o incremento da produção.

Especificamente, quanto à relação teor foliar e a produção, tem-se, diversas fases ou zonas (Figura 108), que merecem ser discutidas.

#### **Faixa ou zona deficiente**

Nesta fase, têm-se os sintomas de deficiência visível. Isto ocorre em solos (ou substratos) muito deficientes no elemento que recebem doses (ainda insuficientes) do nutriente. Nesse caso, a resposta em produção de matéria seca pela planta é muito grande, não permitindo o aumento do teor foliar do elemento, podendo haver até diluição. Este efeito de diluição do nutriente pela formação de material orgânico, é também conhecido por efeito Steembjerg. Assim, a planta que apresenta o teor de um dado nutriente nesta fase, é interpretado como deficiente.

#### **Faixa ou zona de transição**

Nesta fase, embora, tenha sintomas de deficiência não-visível (fome oculta), existe uma relação direta entre o teor foliar e a produção. Assim, quando o teor foliar proporciona 80 a 95% da produção máxima, corresponde o nível crítico. Em seguida tem-se o teor que reflete a máxima produção (100%). Essa relação é observada em solos (ou substratos) com deficiência leve do nutriente, nos quais, a resposta em crescimento e produção à aplicação do nutriente é menor. Nesse caso, ocorrem aumentos proporcionais no teor foliar e crescimento ou produção ou seja a maior absorção é compensada pela formação de mais material orgânico. Assim, a planta que apresenta o teor de um dado nutriente nesta fase, correspondendo a produção entre o nível crítico e a produção máxima ou ótima é interpretado como adequado.

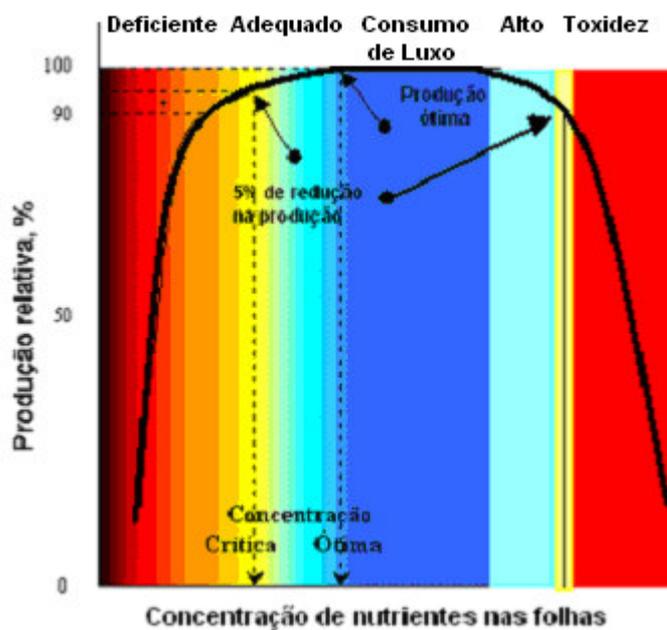
#### **Faixa ou zona de consumo de luxo**

Nesta fase, o aumento da concentração do nutriente não resulta em aumento da produção. Esse fato é observado em solos não deficientes do nutriente que recebem doses do elemento. Nesse caso, a planta absorve, mas não responde em crescimento, ocorrendo aumento da sua concentração (teor) nos tecidos da planta. Assim, a planta que apresenta o teor de um dado nutriente nesta fase, correspondendo a produção máxima ou ótima até atingir nível crítico de toxidez (corresponde ao dado teor que promove queda de 5 a 20% da produção máxima), é interpretado como alto.

#### **Faixa de toxidez**

Esta fase inicia quando o aumento do teor do nutriente diminui significativamente a produção. Assim, quando um dado teor do nutriente promove queda igual ou superior 5 a 20% da produção máxima, é interpretado como nível tóxico. Essa relação é observada em solos (ou substrato) com excesso do nutriente e que recebe doses do mesmo; a planta o absorve, aumenta o teor no tecido, mas decresce o crescimento devido a sua toxidez ou deficiência induzida de outro nutriente, devido ao desequilíbrio.

Nos trabalhos de pesquisa, o nível crítico de deficiência é o mais estudado, corresponde, portanto, à concentração abaixo da qual a taxa de crescimento (produção ou qualidade) é significativamente diminuída e, acima dela, a produção é pouco econômica.



**Figura 108.** Relação entre o teor do elemento e produção relativa.

$$\text{Produção relativa} = \frac{\text{colheita em presença do nível } x \text{ do elemento}}{\text{colheita em presença do nível máximo do elemento}} \times 100$$

Após atingir a produção máxima, o aumento da concentração do nutriente na folha não vai mais resultar em acréscimo de produção e, assim, a planta passa a realizar um “consumo de luxo”. Salienta-se que no consumo de luxo, tem-se acúmulo dos nutrientes nos vacúolo das células, que poderá ser liberado gradualmente para atender as eventuais necessidades nutricionais das plantas. Após a faixa de concentração do nutriente que caracteriza o consumo de luxo, o acréscimo do nutriente no tecido vegetal pode levar à diminuição da produção, caracterizando a zona de toxidez.

Salienta-se, que na diagnose foliar é necessário que a planta esteja em uma época de máxima atividade fisiológica, como no florescimento ou início de frutificação.

Em virtude desta exigência da análise química das folhas no auge do desenvolvimento da planta, coloca-se a diagnose foliar com pouca ação na eventual correção da deficiência de nutrientes em culturas anuais no mesmo ciclo de produção da cultura. Entretanto, em culturas perenes como cafeeiro, citros, etc., a diagnose foliar apresenta potencial elevado no diagnóstico do estado nutricional da planta, possibilitando a correção no mesmo ano agrícola, com satisfatória eficiência.

Ressalta-se, ainda, que a diagnose foliar tem como vantagem utilizar a própria planta como extrator.

Por fim, acrescenta-se que a diagnose foliar tem várias aplicações:

- a) avaliação da exigência e exportação de nutrientes em culturas;
- b) identificação de deficiências que provocam sintomas semelhantes, dificultando ou impossibilitando a diagnose visual;
- c) avaliação do estado nutricional auxiliando manejo de programas de adubação.

A diagnose foliar constitui um método direto de avaliação do estado nutricional das culturas, pois utiliza o teor do nutriente presente na planta. Por outro lado existem os métodos indiretos que avalia o nível de um composto orgânico ou a atividade de uma enzima, onde o nutriente faz parte deste composto orgânico ou é ativador desta enzima, ou seja, planta deficiente em N deverá apresentar baixa quantidade de clorofila ou baixa atividade da redutase de nitrato (o  $\text{NO}_3^-$  induz a enzima, pois é substrato dela). Neste sentido, Malavolta et al. (1997) descreveram para diversos nutrientes testes bioquímicos que poderiam ser realizados para avaliar o estado nutricional da planta. Por exemplo: N (atividade da redutase, sintetase da glutamina, N amídico, asparagina); P (frutose-1,6-2P e fotossíntese; atividade da fosfatase); K (teores de amidas e de ácido pipecólico; teor de putrescina); Mg (ácido pipecólico); S (reação com glutaraldeído; aminoácidos livres); Mn (peroxidases; relação clorofila a/b); B (atividade ATPase); Zn (ribonuclease; anidrase carbônica; teor de arginina). No caso do P, outros estudos indicam que o Pi nas células do vacúolo pode indicar o estado nutricional da planta (Bollons Barraclough, 1997; 1999).

## 17.2 Critérios de amostragem de folhas

É oportuno informar que somente será válido um resultado de análise foliar se houver um padrão para que o mesmo seja comparado. Existem variações entre espécies e intra-espécies, dificultando sobremaneira a generalização dos padrões. Assim, o controle rigoroso destes critérios é que garantirá a validade do resultado da análise química foliar, sua interpretação e a correção das deficiências com as futuras adubações. Soma-se a isto, o fato de que é na etapa de amostragem que ocorre a maioria dos erros que podem comprometer um programa de adubação. Assim, advém da amostragem malfeita e não por problemas analíticos de laboratório ou, ainda, do uso de tabelas de recomendação inadequadas.

Para a amostragem correta da folha-diagnose propriamente dita, devem-se considerar alguns critérios que são específicos a cada cultura como:

\* **Tipo de folha**

\* **Época de coleta**

\* **Número de folhas por talhão**

Quanto ao **tipo de folha**, normalmente é a recém-madura totalmente desenvolvida, pois esta deve ter uma maior sensibilidade para refletir o real estado nutricional da planta, além de ter sofrido pouco efeito da redistribuição dos nutrientes. Esta folha é chamada de folha-diagnose ou folha-índice. A padronização da mesma é importante visto que a folha mais velha apresenta maior concentração de nutrientes pouco móveis (Ca, S e micros) e a muito nova tem maior concentração dos nutrientes móveis (N, P e K). Neste sentido, Chadha et al. (1980), em mangueira, observaram maior estabilidade ou equilíbrio dos macro e micronutrientes nas folhas com idade de 6-8 meses (folhas com idade média, ou seja, nem novas, nem velhas), (Tabela 81). Entretanto, apenas o N aumentou nas folhas mais velhas devido à aplicação de fertilizante nitrogenado nesta época.

**Tabela 81.** Efeito da idade da folha na concentração de nutrientes da mangueira

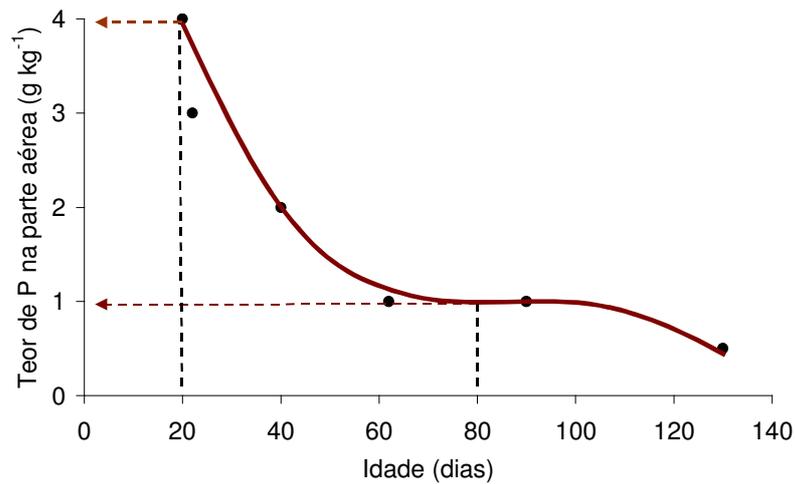
Idade folhas	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Mn	Fe
meses	%				mg/kg					
1	1,28	0,152	1,07	0,91	0,20	0,088	20	12	27	105
2	1,18	0,118	0,98	1,08	0,29	0,081	28	11	32	153
3	1,19	0,980	0,81	1,22	0,32	0,105	28	11	46	171
4	1,17	0,090	0,77	1,31	0,34	0,088	14	8	46	129
5	1,20	0,084	0,81	1,40	0,32	0,114	15	12	54	193
6	1,17	0,073	0,70	1,59	0,35	0,113	13	11	63	156
7	1,17	0,073	0,64	1,67	0,33	0,114	13	10	63	154
8	1,17	0,073	0,58	1,72	0,33	0,115	12	12	78	169
9	1,16	0,066	0,57	1,88	0,31	0,113	17	21	100	143
10	1,28	0,073	0,48	1,91	0,34	0,119	22	22	87	108
11	1,29	0,070	0,54	2,07	0,33	0,139	15	14	112	145
12	1,30	0,077	0,42	2,12	0,37	0,132	50	17	100	182

A pesquisa que busca identificar a folha-diagnose deve isolar a folha mais sensível para discriminar com clareza os teores de nutrientes no tecido vegetal que expressam níveis deficientes, adequados e tóxicos. Além disso, os nutrientes não podem sofrer variações abruptas com a época de amostragem.

Assim, a folha a ser coletada deve ser a mesma da qual foi obtido o nível crítico/faixa adequada que compõem o padrão das Tabelas para respectiva cultura.

A **época de amostragem** deve ocorrer em estádios fisiológicos definidos, uma vez que os nutrientes podem variar com a idade da planta. Por exemplo, quando a planta de arroz está com 20 dias de idade, o teor adequado de P na parte aérea é de 4 g kg<sup>-1</sup> e quando a planta atingiu a idade de 80 dias, o teor adequado de P é de 1 g kg<sup>-1</sup> de matéria seca (Figura 109)(Fageria et al., 2004). Isto significa que os dados da análise de plantas devem ser calibrados com a idade da planta.

Normalmente, é adotado que a época de amostragem deve coincidir com a maior atividade fisiológica da planta (ou atividade fotossintética), muitas vezes ocorre na época da fase reprodutiva das plantas. Nesta época, a concentração de nutrientes é maior.



**Figura 109.** Teor de fósforo na planta de arroz de terras altas em função da idade da planta (Adaptado de Fageria et al., 2004).

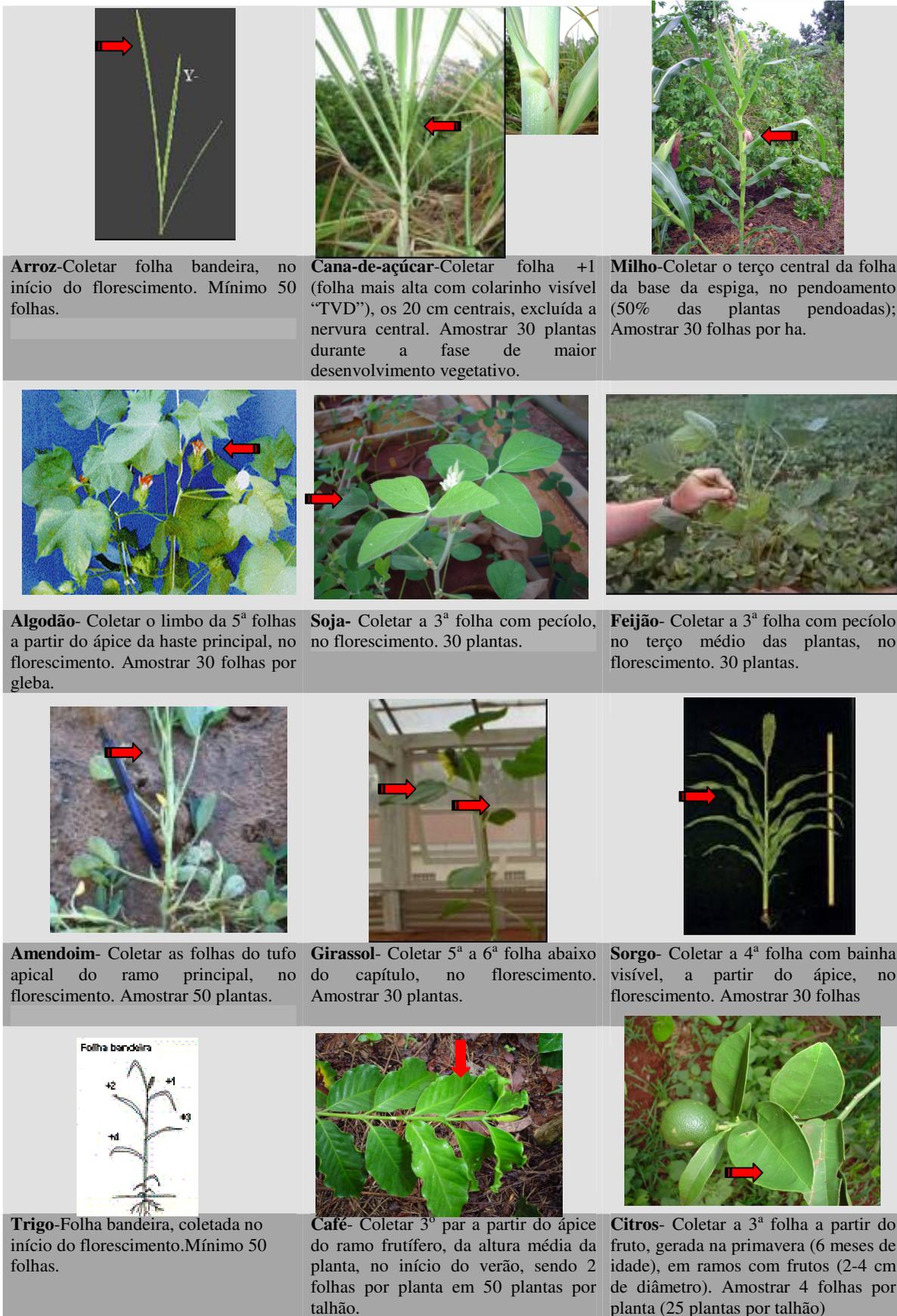
Neste sentido, Natale et al. (1994) observaram que a melhor correlação (valor de  $R^2$ ) das doses de fertilizante nitrogenado e N foliar ocorreu na época do florescimento comparado à frutificação (Tabela 82). De toda a forma, a época de amostragem de folhas de uma determinada cultura deve coincidir com a época de coleta de folhas utilizadas pela pesquisa para estabelecer o nível crítico/faixa adequada ou padrões.

**Tabela 82.** Relação de doses de nitrogênio e o teor foliar avaliado na época do florescimento e frutificação

Variáveis	Safra	Amostragem	Equação	$R^2$
N foliar X Doses	89/90	Florescimento	Linear	0,90**
		Frutificação	Linear	0,56**
	90/91	Florescimento	Quadrática	0,99**
		Frutificação	Linear	0,92**
	91/92	Florescimento	Quadrática	0,97**
		Frutificação	Linear	0,78**

Com relação ao **número de folhas** é normalmente utilizado de 25 a 100 folhas por amostra. O erro da amostragem normalmente diminui em amostragem que utiliza o maior número de folhas e associado com maior número de plantas (Holland et al., 1967).

Na literatura, existem indicações de amostragem para diversas culturas (Figura 110). Entretanto, para algumas culturas, ainda não foram definidos estes padrões de amostragem de folhas sustentados pela experimentação.



**Figura 110.** Critérios de amostragem de folhas para análise química em culturas (Raj et al., 1996).

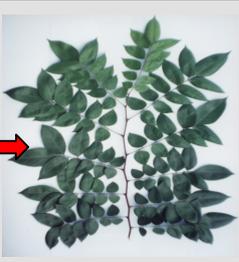
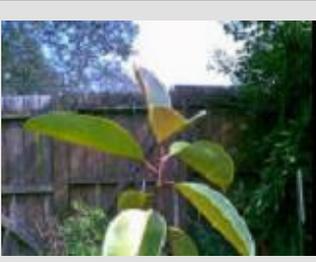
		
<p><b>Manga</b>- Coletar folhas do meio do último fluxo de vegetação de ramos com flores na extremidade. Amostrar 4 folhas por árvore, 20 plantas por talhão.</p>	<p><b>Abacaxi</b>- Coletar antes da indução floral, uma folha recém-madura “D” (4ª folha a partir do ápice). Cortar as folhas (1 cm de largura), eliminando a porção basal sem clorofila.</p>	<p><b>Goiaba</b><sup>1</sup>-Coletar o 3º par de folhas com pecíolo, a partir da extremidade do ramo, a 1,5 m do solo. Amostrar 4 pares de folhas por árvore, em 25 plantas por gleba.</p>
		
<p><b>Banana</b>-Retirar os 5-10 cm centrais da 3ª folha a partir da inflorescência, eliminando a nervura central e metades periféricas. Amostrar 30 plantas.</p>	<p><b>Maracujá</b>- Coletar no outono a 3ª ou 4ª folha, a partir do ápice de ramos não sombreados ou folha com botão floral na axila, prestes a se abrir. Amostrar 20 plantas.</p>	<p><b>Pêssego</b>- Coletar 26 folhas recém-maduras e totalmente expandidas, da porção mediana dos ramos. Amostrar 25 plantas por talhão.</p>
		
<p><b>Acerola</b>- Amostrar nos quatro lados da planta, folhas jovens totalmente expandidas, dos ramos frutíferos. Amostrar 50 plantas.</p>	<p><b>Abacate</b>- coletar, em fevereiro/março, folhas recém-expandidas com idade entre 5 a 7 meses, da altura média das copas. Amostrar 50 árvores.</p>	<p><b>Caju</b>*-Coletar folhas maduras (quarta folha) de novos crescimentos em pomares em produção. Amostrar 4 folhas por árvore em 10 plantas.</p>
		
<p><b>Carambola</b><sup>2</sup>-Coletar a 6ª folha com pecíolo, em ramos com flores, nos meses de agosto a outubro. Coletar 30 folhas por gleba.</p>	<p><b>Seringueira</b>- Em árvores até de 4 anos, retirar 2 folhas mais desenvolvidas da base de um buquê terminal situado no exterior da copa e em plena luz. Em árvores de mais de 4 anos, colher 2 folhas mais desenvolvidas no último lançamento maduro em ramos baixos na copa em áreas sombreadas. Amostrar 25 plantas no verão.</p>	<p><b>Eucalipto</b>- Coletar folhas recém-maduras normalmente o penúltimo ou antepenúltimo lançamento de folhas dos últimos 12 meses, do terço superior da copa. Amostrar no final do inverno, pelo menos 20 árvores por talhão.</p>

Figura 110. Continuação. <sup>1</sup>- Natale et al. (1996) e <sup>2</sup>- Prado & Natale (2004).

Os critérios para amostragem de folhas de outras culturas, segundo Raij et al. (1996):

**Cacau** – Coletar 2<sup>a</sup> e 3<sup>as</sup> folhas verdes, a partir do ápice do ramo, da altura média da planta, 8 semanas após o florescimento principal. Amostragem 4 folhas por árvore em 25 plantas.

**Mamão** – Coletar 15 pecíolos de folhas jovens, totalmente expandidas e maduras (17<sup>a</sup> a 20<sup>a</sup> folhas a partir do ápice), com uma flor visível na axila.

**Figo** – Coletar folhas recém-maduras e totalmente expandidas, da porção mediana dos ramos, três meses após a brotação. Amostras de 25 plantas por talhão, num total de 100 folhas.

**Uva** – Coletar a folha recém-madura mais nova, contada a partir do ápice dos ramos da videira, retirando um total de 100 folhas.

**Batata** – Coletar a 3<sup>a</sup> folha a partir do tufo apical, aos 30 dias. Amostragem 30 plantas.

**Melancia/melão** – Coletar a 5<sup>a</sup> folha a partir da ponta, excluindo o tufo apical da metade até 2/3 do ciclo da planta. 15 plantas.

**Morango** – Coletar a 3<sup>a</sup> ou 4<sup>a</sup> folha recém-desenvolvida (sem pecíolo), no início do florescimento: 30 plantas.

**Feijão-vagem** – Coletar a 4<sup>a</sup> folha a partir da ponta, do florescimento ao início da formação das vagens: 30 plantas.

**Cenoura** – Coletar a folha recém-madura, metade a 2/3 do crescimento: 20 plantas.

**Beterraba** – Coletar a folha recém-desenvolvida: 20 plantas.

**Ervilha** – Coletar a folha recém-desenvolvida, no florescimento: 50 folíolos.

**Alface** – Coletar a folha recém desenvolvida, metade a 2/3 do crescimento: 15 plantas

**Couve-flor** – Coletar a folha recém-desenvolvida, formação da cabeça: 15 plantas.

**Tomate** – Coletar a folha com pecíolo, por ocasião do 1<sup>o</sup> fruto maduro: 25 plantas.

**Abóbora** – Coletar a 9<sup>a</sup> folha a partir da ponta, no início da frutificação: 15 plantas.

**FORAGEIRAS (gramíneas)** – Coletar a brotação nova e folhas verdes, durante a fase de crescimento ativo (novembro a fevereiro).

**FORAGEIRAS (leguminosas)** – idem ao anterior, exceto algumas leguminosas, como: soja perene - coletar a ponta dos ramos desde o ápice até a 3<sup>a</sup>-4<sup>a</sup> folhas desenvolvidas; estilosantes – coletar o ponteiro da planta

(cerca de 15 cm); leucena – coletar ramos novos com diâmetro até 5 mm; alfafa – coletar o terço superior no início do florescimento.

O procedimento que deve ser seguido no campo para colher a amostra de folhas é semelhante ao descrito no caso da amostragem de solo:

- \* Caminhamento em ziguezague;
- \* Caminhamento em nível;
- \* Evitar plantas próximas de estradas ou carreadores.

Além disso, não se deve proceder a amostragem de folhas nas seguintes condições:

- \* plantas com sinais de pragas e moléstias (Tabela 83);
- \* glebas que receberam adubação há menos de 30 dias ou defensivos;\* variedades diferentes;
- \* no caso de culturas perenes enxertadas não misturar folhas de plantas que tinham copa ou porta-enxerto diferentes;
- \* em nenhum caso são misturadas folhas de idades diferentes;
- \* em se tratando de culturas perenes não se pode colocar na mesma amostra folhas de ramos produtivos e folhas de ramos não produtivos.
- \* tecidos mortos ou com danos (mecânicos)

**Tabela 83.** Composição de cátions de folhas de algodoeiro colhidas de plantas sadias ou afetadas pelo “vermelhão”

Elemento	Plantas	
	Sadias	Doentes
	$\text{g kg}^{-1}$	
K	18,3	15,9
Ca	37,0	31,1
Mg	6,3	4,9

Por fim, na hipótese de um problema isolado em determinada cultura. Por exemplo, para se avaliar qual é o nutriente que estaria causando um determinado sintoma de deficiência numa planta qualquer, recomenda-se retirar amostras de folhas com os sintomas bem acentuados, separadas de outras amostras com sintomas menos acentuados e ainda deve-se colher folhas sem sintomas, devendo em todos os casos as folhas amostradas serem da mesma idade e mesma posição na planta.

### 17.3. Preparo de material vegetal e análises químicas

O preparo do material vegetal e a análise química, ocorre normalmente no laboratório de Nutrição de Plantas, constituindo etapa importante em estudos de diagnose foliar. Neste sentido, Hanlon et al. (1995) relataram que a interpretação da análise química foliar pode sofrer influência além do estágio fisiológico da folha coletada, do método analítico e pelos procedimentos de preparo da amostra.

Na época da coleta das amostras no campo, as mesmas devem ser identificadas de acordo com o talhão com preenchimento de um formulário com as seguintes informações:

<b>Formulário da amostra de solo</b>		
<b>Amostra nº. ____ . Identificação do Produtor: _____</b>		
<b>1 - Identificação</b>		
Nome do proprietário:		
Nome da propriedade:		
Endereço:		
Responsável pela remessa:		
<b>2 - Descrição da amostra</b>		
Data da amostragem:		
Tipo da folha amostrada:		
Cultura:	Variedade:	Idade:
Data da última pulverização foliar:		
<b>3 - Nutrientes a serem analisados:</b>		
( ) macronutrientes ( ) micronutrientes (Fe, Mn, B, Zn, Cu) ( ) outros ____		
<b>4 - Recomendações desejadas:</b>		

Após a amostragem das folhas no campo, alguns procedimentos imediatos devem ser tomados, tais como (Malavolta, 1992):

a) Se a amostra puder chegar ao laboratório no máximo em dois dias depois da coleta: colocar em sacos de papel e enviar ao laboratório.

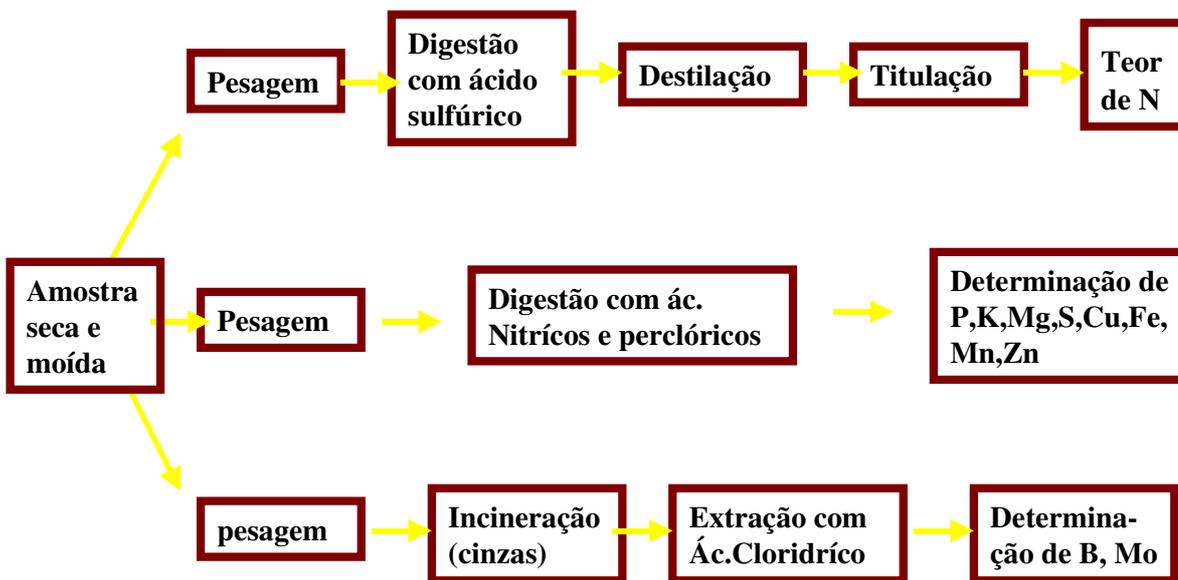
b) Se a amostra chegar ao laboratório em mais de dois dias depois da coleta: lavar na seqüência: água corrente; solução detergente (0,1%) e água; secar em forno regulado para temperatura próxima de 70°C ou a pleno sol (para interromper a respiração das folhas); colocar em saco de papel e enviar ao laboratório. Entretanto, é possível a conservação do material vegetal por 2-3 dias em refrigerador (ou isopor com gelo), sem que haja deterioração, assim não necessitando de secagem no campo.

Em seguida, ao chegar ao laboratório, a amostra de folha passa pelos seguintes tratamentos:

- a) registro: a amostra recebe um número que a identifica;
- b) lavagem em caso de folhas frescas com: água corrente; solução detergente (0,1%); solução ácido clorídrico (0,3%); água destilada e secagem (para aquelas amostras recém-coletadas);
- c) moagem: pulverização em moinho para se ter material fino e homogêneo para análise;
- d) armazenamento: as folhas moídas são colocadas em sacos de papel devidamente etiquetados, onde ficam até o momento da análise propriamente dita.

Ainda no laboratório, a amostra que será analisada deverá ser submetida a diferentes procedimentos para a análise química como: a) pesagem; b) obtenção do extrato; c) determinação do elemento (Figura 111).

### **No laboratório: Análise química**



**Figura 111.** Esquema simplificado do processo de análise foliar em um laboratório de nutrição de plantas.

Para obtenção do extrato, é preciso fazer a digestão, que consiste na retirada dos elementos de compostos orgânicos ou adsorvidos a esses compostos (mineralização), podendo ser por diferentes tipos de digestão (Bataglia et al., 1983; Malavolta et al., 1997). Assim, será apresentado resumidamente os procedimentos analíticos de análise química de plantas, conforme Malavolta et al. (1997).

**Digestão por via seca:** por meio da incineração do material (para B e Mo);

**Digestão por via úmida:** por meio de ácidos fortes, que compreende a digestão sulfúrica (para o N) e a digestão nitroperclórica (para os demais, exceto o B, N e Cl). A nitroperclórica é a preferida por operar em baixa temperatura, sem perdas por volatilização de nutrientes ( $\text{PE} - \text{HClO}_4 = 208^\circ\text{C}$ ;  $\text{HNO}_3 = 85^\circ\text{C}$ ). O Cl é extraído por água.

**Digestão por agitação:** por meio da água (para o Cl).

**a) Digestão por via seca (B, Mo):**

- Pesar 0,2 g de matéria seca (M.S.);
- transferir o material vegetal para cadinho e incinerar em forno elétrico a  $500-550^\circ\text{C}$  até obtenção de cinza branca (mais ou menos 3 horas de duração);
- esfriar e adicionar 10 mL de HCl 0,1N, dissolvendo-se a cinza;
- deixar em repouso o resíduo, obtendo-se o extrato.

**b) Digestão por via úmida (nitroperclórica) (P,K,Ca,Mg,S,Cu,Fe,Mn,Zn):**

- pesar 1 g de M.S.;
- inicialmente faz a digestão a frio: 5 mL  $\text{HNO}_3$  g M.S. (deixar em repouso por um dia);
- adicionar mais 5 mL  $\text{HNO}_3$  g M.S.;
- no período da manhã, deixar o material no bloco digestor para a digestão lenta da M.S. (tem-se uma digestão parcial da M.S.) e em seguida, deixar esfriar;
- no período da tarde, adicionar ácido perclórico 2 mL  $\text{g}^{-1}$  M.S.) e aquecer (à tarde), até obter um extrato incolor;
- evitar o superaquecimento (até  $210^\circ\text{C}$ ), pois causa perdas de P e S.;
- completar extrato a 50 mL.

**c) Digestão por via úmida (sulfúrica) (N):**

- pesar 0,1 g M.S.
  - proceder à mistura digestora (ácido sulfúrico+catalisadores+sais), isto eleva o ponto de ebulição.
  - Em um becker de 1000 mL adicionar a mistura:
    - 175 mL de água destilada;
    - 3,6g de  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ;
    - 21,39g de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;
    - 4,0 g de  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ;
    - 200 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado.
  - juntar 0,1 g de M.S. e 7 mL da mistura para um balão de Kjeldahl ou para tubo de digestão.
  - levar para o bloco digestor, aumentando a temperatura de 40°C a cada 30 min., até atingir 350°C, mantendo-se assim até completar a digestão, caracterizada pela obtenção de um líquido incolor ou levemente esverdeada (mais ou menos 3 horas de duração).

**d) Digestão aquosa por agitação (Cl):**

- pesar 100 mg de matéria seca em erlenmeyer de 50 mL;
- adicionar 25 mL de água destilada fechando-o com tampa de borracha;
- agitar aproximadamente a 100 rpm em agitador horizontal por 10 min.;
- tomar uma alíquota de 10 mL desse extrato e pipetar para cápsula de porcelana, obtendo-se o extrato.

Na determinação do elemento, é realizada a leitura dos nutrientes presentes no extrato da solução. Os métodos de determinação são: P por calorimetria; K e Ca por fotometria de chama ou absorção atômica ou titulação; Mg por absorção atômica, calorimetria; S por gravimetria ou turbidimetria; Cu por calorimetria ou absorção atômica; Fe e Zn por calorimetria ou absorção atômica; Cl por titulação; Mo por calorimetria.

Com relação ao Mo, praticamente não é feita sua determinação em laboratórios de rotina, visto a falta de calibração para o mesmo e ainda, o teor foliar é muito baixo ( $<0,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ), dificultando sua detecção pelo aparelho. Entretanto, por colorimetria (reação entre iodeto de potássio e peróxido de hidrogênio), a precisão da determinação do Mo passa a ser adequada (Polidoro et al., 2006).

## 17.4. Estudos sobre diagnose foliar em culturas

Conforme dito anteriormente, para avaliar o estado nutricional das culturas, pode-se utilizar diferentes ferramentas como a diagnose foliar (nível crítico/faixa adequada ou DRIS), diagnose visual e análise química do solo.

### a) Diagnóstico foliar (nível crítico ou faixa adequada)

Na opção da diagnose foliar, para avaliação do estado nutricional das plantas, deve-se realizar alguns procedimentos, como: amostragem de folhas, preparo do material, análise química no laboratório e a obtenção dos resultados analíticos (Figura 112). Estes resultados poderão ser utilizados pela pesquisa para a definição de níveis críticos e confecção das tabelas de teores adequados (padrões) ou caso já existam essas tabelas, fazer apenas as comparações e as devidas interpretações que indicaram se os nutrientes estão em teores adequados, deficientes ou em excesso. Assim, tem-se o diagnóstico do estado nutricional das culturas, que servirá para recomendação de adubação ou ajuste, com reflexos diretos na expressão da produtividade e lucratividade da exploração agrícola.



**Figura 112.** Fluxograma da avaliação do estado nutricional das plantas e seus desdobramentos por meio do nível crítico ou faixa adequada.

Na literatura, existem as Tabelas com os teores dos nutrientes, que consistem nos padrões de culturas ditas normais (alto crescimento e produção). Assim, a Tabela 84 apresenta os teores foliares de macro e micronutrientes considerados adequados para várias culturas (Raij et al., 1996).

Conforme dito, com os resultados da análise química foliar de uma determinada amostra, pode-se comparar com o padrão (Tabelas), onde então podem ocorrer três situações:

- o teor da amostra é menor do que o teor considerado padrão. Isto indica uma possível deficiência;
- o teor na amostra é igual ao teor considerado padrão, indicando não haver nem deficiência, nem toxidez;
- o teor na amostra é maior do que o teor considerado padrão, indicando uma possível toxidez do elemento.

**Tabela 84.** Faixas de teores adequados de macro e micronutrientes em folhas de algumas culturas (Adaptado de Raij *et al.*, 1996)

Cultura	N	P	K	Ca	Mg	S
	$\text{g kg}^{-1}$					
Arroz	27-35	1,8-3,0	13-30	2,5-10	1,5-5,0	1,4-3,0
Milho	27-35	2,0-4,0	17-35	2,5-8,0	1,5-5,0	1,5-3,0
Trigo	20-34	2,1-3,3	15-30	2,5-10	1,5-4,0	1,5-3,0
Café	26-32	1,2-2,0	18-25	10-15	3,0-5,0	1,5-2,0
Algodão	35-43	2,5-4,0	15-25	20-35	3,0-8,0	4,0-8,0
Laranja	23-27	1,2-1,6	10-15	35-45	2,5-4,0	2,0-3,0
Soja	40-54	2,5-5,0	17-25	4-20	3-10	2,1-4,0
Cana-de-açúcar	18-25	1,5-3,0	10-16	2-8	1-3	1,5-3,0
	$\text{mg kg}^{-1}$					
	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
Arroz	4-25	3-25	70-200	70-400	0,1-0,3	10-50
Milho	10-25	6-20	30-250	20-200	0,1-0,2	15-100
Trigo	5-20	5-25	10-300	25-150	0,3-0,5	20-70
Café	5-80	10-20	50-200	50-200	0,1-0,2	10-20
Algodão	30-50	5-25	40-250	25-300	-	25-200
Laranja	36-100	4-10	50-120	35-300	0,1-1,0	25-100
Soja	21-55	10-30	50-350	20-100	1,0-5,0	20-50
Cana-de-açúcar	10-30	6-15	40-250	25-250	0,05-0,20	10-50

Obs.: Estes teores adequados de nutrientes são válidos apenas para as culturas que tiveram a amostragem de folhas realizadas segundo Raij et al. (1996), apresentado na **Figura 110**.

Cabe ressaltar que os valores adequados dos nutrientes devem ser considerados para o respectivo critério de amostragem de folhas, ou seja, a folha que resultou a amostra deve ser a mesma do padrão (que é “Tabelado”); caso contrário, a interpretação dos resultados não será confiável. Neste sentido, o teor adequado de nutriente dependem da folha diagnose, ou seja, tomando como exemplo a cultura do milho, para a folha abaixo à espiga é diferente da folha oposta e abaixo da espiga (Tabela 85). Sendo que a primeira metodologia indica uma folha mais nova e, portanto, com maior teor de nutrientes, especialmente os móveis.

**Tabela 85.** Teor foliar adequado dos macronutrientes na cultura do milho em função do tipo da folha diagnóstica

Nutrientes	Raij et al. (1996) <sup>1</sup>	Malavolta (1992) <sup>2</sup>
	g kg <sup>-1</sup>	
N	27-35	27-33
P	2,0-4,0	2,5-3,0
K	17-35	21-30
Ca	2,5-8,0	2,0-5,0
Mg	1,5-5,0	2,1-4,0
S	1,5-3,0	2,0-3,0

<sup>1</sup> terço central da folha da base da espiga, no florescimento masculino (50% das plantas pendoadas); <sup>2</sup> limbo da folha oposta e abaixo da espiga, no florescimento feminino (aparecimento do “cabelo”).

Estes níveis adequados, presentes nas Tabelas, podem ser obtidos por extrapolação de plantas cultivadas em outros países e transferidas para o Brasil, onde podem estar embutidos erros devido às condições edafoclimáticas diferentes. Uma segunda forma é pela experimentação local conduzida no Brasil. Esta última forma de obtenção dos níveis adequados dos nutrientes é a mais precisa para garantir as maiores produtividades com o uso da diagnose foliar. Para isso, são instalados experimentos de campo, onde são usados comumente mais de três doses de um dado nutriente, na presença de doses suficientes dos demais elementos. Assim, obtêm-se as relações já ditas anteriormente que são:

- a) Dose (suprimento do nutriente pelo solo) x teor foliar.
- b) Dose (suprimento do nutriente pelo solo) e/ou teor do nutriente do solo x produção.
- c) **teor foliar x produção.**

Assim, com a relação teor foliar versus produção, é possível estabelecer os níveis adequados de nutrientes nas plantas. Existem trabalhos de pesquisa com estas relações, para diversos nutrientes e culturas, a exemplo do N em mangueira, citrus e cafeeiro, onde o teor crítico foi 1,3% (13 g kg<sup>-1</sup>), 27 g kg<sup>-1</sup> (Figura 113) e 31 g kg<sup>-1</sup> (Figura 114), respectivamente. Na goiabeira, o nível crítico de Ca foi de 8,5 g kg<sup>-1</sup> (Figura 114). Nestas relações de aumento das doses do nutriente (ou do teor foliar) e produção, está associado um coeficiente de variação ou um erro experimental, comum em experimentos de campo, admitindo-se adotar níveis adequados um pouco acima do nível crítico, numa faixa de suficiência (~100% da produção máxima), para que a futura recomendação de adubação garanta a obtenção da produtividade esperada. Deste modo, dependendo do autor a interpretação de teor de nutrientes foliar baixo, médio, adequado e alto está associado com produção relativa <70%, 70-90%; 90-100% e >100%, respectivamente.

Assim, para a interpretação dos resultados do estado nutricional das plantas, a faixa de suficiência, é a mais adequada, comparado ao valor pontual como nível crítico. Isso porque além do coeficiente de variação, obtido na obtenção da curva de calibração, conforme comentado anteriormente, as culturas apresentam variações genéticas pela diversidade de variedade e/ou híbridos/clones. Portanto, o método de interpretação do nutriente foliar pela faixa adequada é menos afetado pelas variações do ambiente e da própria planta.

Fontes (2001) indica que no diagnóstico da cultura, deve-se levar em consideração o nível crítico do nutriente associado a uma análise fitotécnica (desenvolvimento) da cultura, uma vez que a concentração do nutriente no tecido é expressa em termos relativos, isto é, quantidade do nutriente/quantidade de matéria seca.

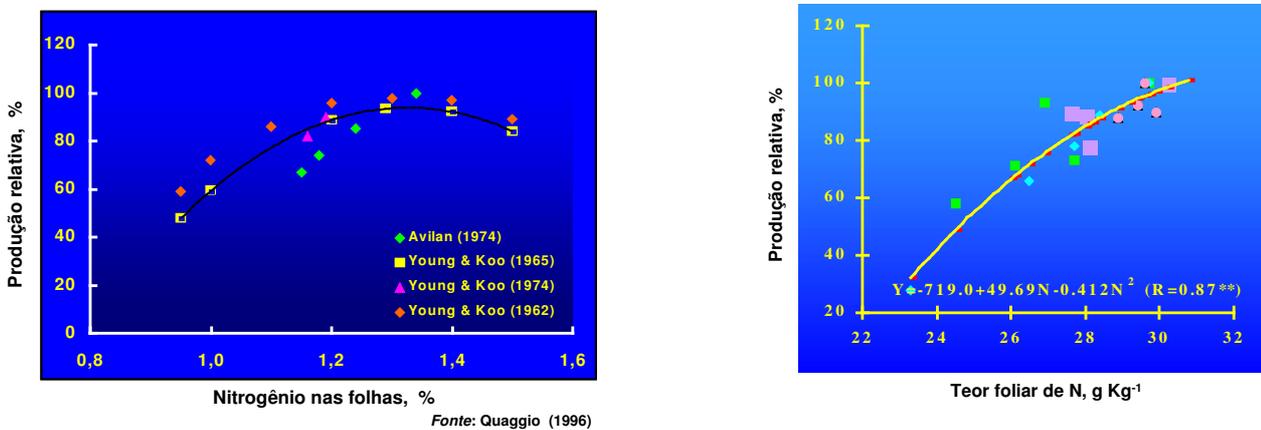


Figura 113. Efeito do nitrogênio foliar na produção da mangueira e do citrus.

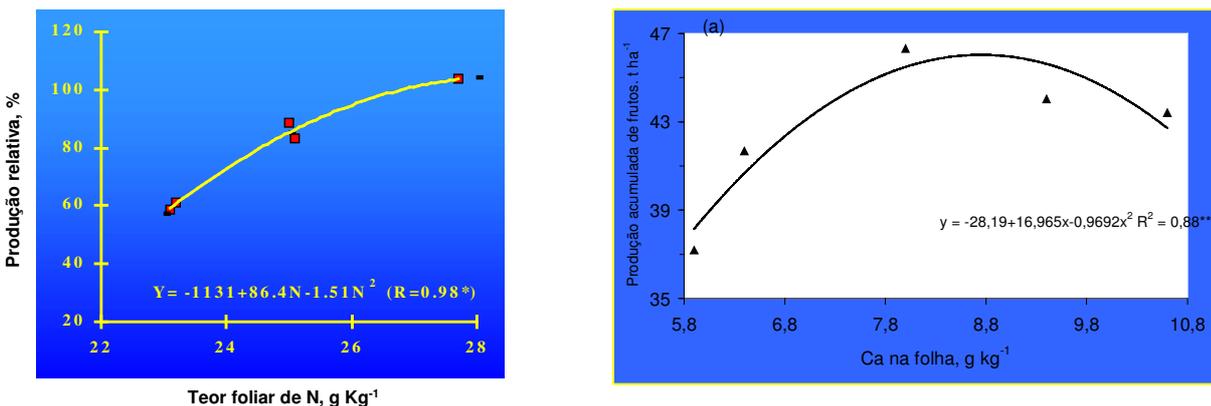


Figura 114. Efeito do nitrogênio foliar na produção do cafeeiro e do Ca foliar na produção da goiabeira

Por fim, uma outra aplicação da diagnose foliar é no levantamento do estado nutricional de uma cultura em uma dada região. Com estes dados, pode-se inferir eventuais problemas na condução das

lavouras, como os baixos teores de Ca/Mg, que podem indicar baixo uso de calcário, assim como baixos teores de P e K, podem indicar a fertilização ineficiente, entre outros.

Como exemplo, tem-se um levantamento do estado nutricional de lavouras cafeeiras, na região da zona da mata (Minas Gerais), onde a maioria das propriedades apresenta teores foliares abaixo do nível crítico, como o Ca (74%), indicando possível problema com a calagem e também com P (91%), K (82%) e B (100%), as quais devem estar utilizando adubação fosfatada, potássica e boratada em níveis abaixo da exigência das plantas (Tabela 86). Assim, com estas informações, as instituições de extensão podem orientar os produtores da região para adotar práticas agronômicas corretivas, para que a produção agrícola satisfatória seja retomada.

**Tabela 86.** Levantamento nutricional de cafeeiros na zona da mata de Minas Gerais, com base na análise foliar pelo nível crítico ou teor limiar

Nutriente	Nível crítico g kg <sup>-1</sup>	Lavouras deficientes %
N	30,0	41
P	1,2	91
K	18,0	82
Ca	10,0	74
Mg	3,5	32
S	2,0	0
Cu	4,0	0
B	40,0	100

#### b) Diagnóstico foliar (DRIS – Sistema Integrado de diagnose e recomendação)

Conforme comentado anteriormente, os dois critérios de interpretação (nível crítico e faixa adequada) discutidos, baseiam-se no estabelecimento de padrões para plantas produtivas e na comparação das concentrações dos nutrientes das amostras com esses padrões. Nos dois procedimentos, utilizam-se os teores absolutos de nutrientes.

Nestes critérios, tem-se a relação entre o teor do nutriente na folha, obtida em experimentação pelas curvas de calibração, e a produtividade da planta. Desse modo, a comparação de uma amostra qualquer com o padrão deve gerar indicação válida somente quando se têm as mesmas condições edafoclimáticas (temperatura, disponibilidade de água, de outros nutrientes, reação do solo, entre outras) em que foi ajustada a curva de calibração.

Em condições de campo, em lavouras comerciais, as glebas podem não reproduzir as mesmas condições de crescimento e desenvolvimento daquelas obtidas na curva de calibração. Nestas circunstâncias, têm-se as críticas ao método do nível crítico ou faixa adequada, em função de sua capacidade ser limitada em prognosticar o estado nutricional da cultura para determinado nutriente, comprometendo a precisão da futura recomendação de adubação. Enquanto que o DRIS tem essa vantagem de poder ser desenvolvido em glebas comerciais, portanto, próximo das condições reais de cultivo utilizado pelo produtor.

O DRIS foi idealizado como um processo de diagnóstico capaz de superar as limitações do método convencional (nível crítico ou faixa adequada ou de suficiência), discutido anteriormente e, principalmente, por minimizar os efeitos de diluição ou de concentração dos nutrientes em relação às variações no acúmulo de matéria seca pelos tecidos vegetais.

A concepção teórica do DRIS é interessante agronomicamente, pois permite trabalhar com relações entre os nutrientes entre uma determinada amostra com uma população de referência. Assim, em uma lavoura ou população de plantas de alta produção existe uma relação entre nutrientes específica, por exemplo N/K; N/P; P/K etc. Assim, pode existir uma situação em que a baixa produção da cultura se relacione com o desequilíbrio nutricional e, talvez com um pequeno acréscimo daquele nutriente, o problema seja solucionado com reflexo significativo na produção e na lucratividade.

Na verdade, o DRIS é uma técnica baseada na comparação de índices, calculados por meio das relações entre nutrientes. O sistema baseia-se no cálculo de índices para cada nutriente, considerando a sua relação com os demais e comparando cada relação com as relações médias de uma população de referência (alta produção). Para cada nutriente, índices com valores negativos indicam deficiência e, positivos, excesso, enquanto valores próximos de zero correspondem a uma nutrição equilibrada. Assim, esses resultados expressam numericamente a influência de cada nutriente sobre o balanço nutricional da planta.

O sucesso do DRIS vai depender da confiabilidade dos dados obtidos na população de referência, dependente do alto número de observações que, muitas vezes, constitui o “gargalo” do DRIS. Soma-se a isso o fato de que o DRIS não é imune às adversidades, comuns nos outros métodos de diagnose. É necessário que a aplicação do DRIS seja regional e não extrapolada para muitas regiões produtoras e que mantenha controle satisfatório de técnicas de amostragem dos tecidos para a diagnose.

O DRIS foi desenvolvido para a interpretação menos dependente de variações de amostragens com respeito à idade e origem do tecido, permitindo um ordenamento de fatores limitantes de produção, realçando a importância do balanço de nutrientes (Bragança & Costa, 1996).

Embora a concepção teórica do DRIS seja relativamente antiga, pois a primeira publicação foi a de Beauflis (1973), somente no final da década de 90 seu potencial começou a ser explorado, sendo impulsionado principalmente pelo avanço da informática nos últimos tempos.

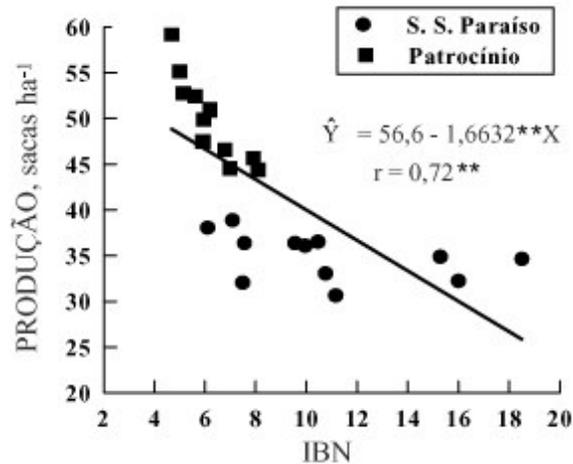
Alguns exemplos didáticos podem indicar a aplicabilidade do DRIS para a avaliação do estado nutricional das plantas, como o citros. A partir de três lavouras (amostras) constatou que o IBN (índice de balanço nutricional) igual a 1, 25 e 50, esteve associado à produção de 10,0; 5,0 e duas caixas por planta (Tabela 87).

Assim, nota-se que o IBN próximo ou igual a 1 indica que os nutrientes encontram-se em equilíbrio na planta, ao passo que IBN alto, indica forte desequilíbrio nutricional, informando, ainda, qual nutriente é o mais limitante, seja por deficiência (número negativo alto) seja por excesso (número positivo alto). Desse modo, observa-se que na gleba com baixa produção (2 caixas por planta) os nutrientes Ca e P foram os mais limitantes por excesso e o Mg foi o que mais prejudicou a produção por deficiência.

**Tabela 87.** Avaliação do estado nutricional dos citrus usando o DRIS em glebas com diferentes produções

Parâmetros	N	P	K	Ca	Mg	S
<b>Gleba produzindo 10,0 caixa por planta</b>						
Teor foliar na amostra, g kg <sup>-1</sup>	29,0	1,3	19,0	45,0	5,7	2,0
Índice DRIS	-2	-2	0	-1	2	3
<b>IBN = 1</b>						
<b>Gleba produzindo 5,0 caixa por planta</b>						
Teor foliar na amostra	28,6	1,3	13,5	40,4	4,0	3,0
Índice DRIS	17	22	-19	16	-49	18
<b>IBN = 25</b>						
<b>Gleba produzindo 2,0 caixa por planta</b>						
Teor foliar na amostra	24,9	1,3	14,0	43,0	2,9	2,9
Índice DRIS	17	42	-11	69	-136	18
<b>IBN = 50</b>						

Portanto, o valor do IBN alto indica a um desequilíbrio nutricional, e conseqüentemente, tem-se baixa produção. Neste sentido, IBN tem correlação significativa com a produção das culturas, a exemplo do cafeeiro (Figura 115).



**Figura 115.** Correlação linear simples entre IBN com a produção do cafeeiro em Minas Gerais (São Sebastião do Paraíso e Patrocínio) (Silva et al., 2003).

Agora fazendo um breve paralelo da interpretação da análise química foliar da cultura do citros pela faixa adequada e pelo DRIS, observou que ambos os critérios foram semelhantes no diagnóstico do estado nutricional da cultura (Tabela 88). Entretanto, pelo método DRIS foi possível eleger em ordem crescente os três nutrientes mais desequilibrados ou os mais limitantes: 1º lugar: B; 2º lugar: P e 3º lugar: Mg (Figura 116). Na rotina do campo, é interessante sempre comparar os dois métodos de diagnóstico (DRIS e faixa adequada), pois podem existir situações em que um método por ser mais sensível que o outro melhor para identificar limitações na amostra. Em cafeeiro, Bataglia et al. (2004) mostraram que a faixa adequada foi melhor critério de interpretação do estado nutricional da cultura que o DRIS em lavouras de alta produção, ao passo que em lavouras de baixa produção ocorreu o contrário.

Por fim, a análise química de folhas, além de ser importante para interpretação do estado nutricional das plantas, por diagnose de deficiência, toxicidade ou desequilíbrio, conforme visto anteriormente, presta-se também para outros objetivos, segundo Fontes (2001):

- a) confirmar a diagnose visual de sintomas de deficiência/toxidez;
- b) identificar “fome oculta”;
- c) verificar se o nutriente aplicado ao solo foi absorvido pela planta;
- d) caracterizar a concentração dos nutrientes nas plantas ao longo do(s) ano(s);
- e) quantificar a remoção de nutrientes pela parte colhida;
- f) prever a produção da cultura (prognóstico);

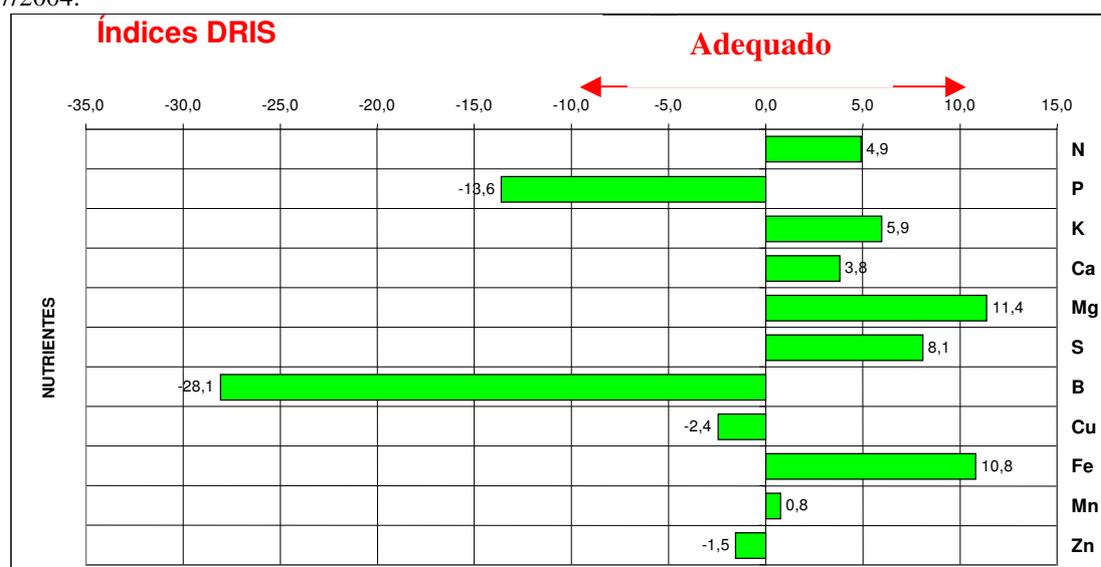
g) mapear áreas de fertilidade no solo e estimar os níveis de nutrientes em dietas disponíveis aos animais.

A análise química de plantas deve ser considerada sempre como uma técnica complementar e não exclusiva, uma vez que não se deve dispensar outros critérios para o diagnóstico e como meios de identificação de problemas nutricionais, tais como a análise do solo e outros (a sintomatologia visual, o uso de plantas indicadoras e a experimentação) (Souza & Carvalho, 1985).

**Tabela 88.** Diagnóstico nutricional de resultados da análise química de folhas do citros interpretados pelo método da faixa adequada<sup>(1)</sup> e pelo DRIS<sup>(2)</sup>

	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg <sup>-1</sup>					
Teor foliar	25,0	0,9	12,8	32,0	3,8	2,4
Faixa adequada	23-27	1,2-1,6	10-15	35-45	2,5-4,0	2,0-3,0
Diagnóstico	adequado	deficiente	adequado	deficiente	adequado	adequado
Índice DRIS	5	-14	6	4	11	8
Diagnóstico	adequado	deficiente	adequado	adequado	excesso	adequado
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo
	mg kg <sup>-1</sup>					
Teor foliar	35,0	14,0	148,0	54,0	44,0	0,9
Faixa adequada	36-100	4-10	50-120	35-300	25-100	0,1-1,0
Diagnóstico	deficiente	adequado	alto	adequado	adequado	adequado
Índice DRIS	-28	-2	11	1	-2	Não det.
Diagnóstico	deficiente	adequado	excesso	adequado	adequado	-
IBN médio	8,3					

<sup>(1)</sup> Faixa adequada segundo Quaggio et al. (1997).; <sup>(2)</sup> Sistema DRIS/CITROS disponibilizado pela POTAFÓS em 07/2004.



**Figura 116.** Índices DRIS para a cultura do citros.



As interações entre nutrientes normalmente são classificadas em três tipos:

**Antagonismo** - A presença de um nutriente diminui a absorção de outro, cuja toxicidade é assim evitada: o  $\text{Ca}^{2+}$  impede a absorção exagerada de  $\text{Cu}^{2+}$ . Este efeito ocorre quando aumenta-se muito a concentração de um cátion no meio diminui a absorção de outro cátion, de forma que a planta busca manter o total de cargas positivas constante.

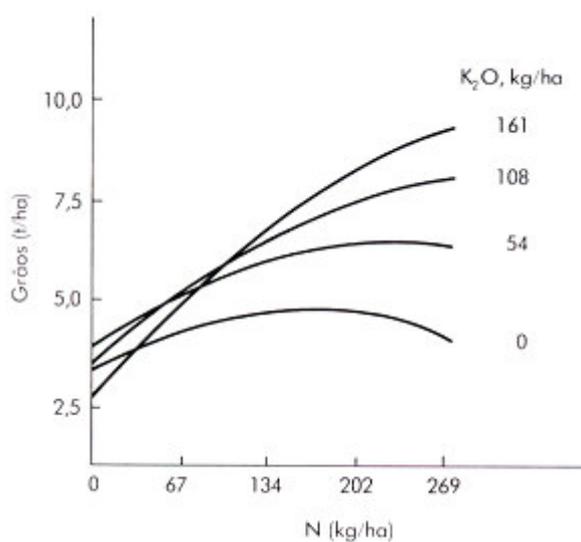
**Inibição** - Consiste na diminuição da absorção de um nutriente, provocada pela presença de um outro íon. Ex.  $\text{K}^+$  inibe absorção de  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  inibe absorção de  $\text{Zn}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$  inibe absorção de  $\text{Zn}^{2+}$ .

**Sinergismo** - A presença de um dado elemento aumenta a absorção de outro nutriente: Ex. o  $\text{Ca}^{2+}$ , em concentrações não muito elevadas, aumenta a absorção de cátions e de ânions por seu papel na manutenção da integridade da plasmalema, o que tem consequência na prática da adubação.

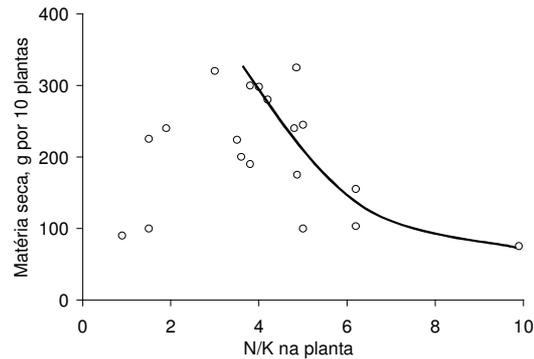
## 18.2 Relações entre nutrientes na análise foliar

### a) Interação N x K

A interação N e K obedece à lei do mínimo, pois quando o N é aplicado em quantidade suficiente para haver elevação da produção, esta passa a ser limitada pelos baixos teores de K aplicado. Assim, as maiores doses de nitrogênio somente promoverão a maior produção se acompanhadas de altas doses de potássio (Figura 117). Relação baixa N/K (cerca de 4) é a que apresenta os maiores efeitos positivos na produção do milho (Figura 118).



**Figura 117.** Efeito de doses de nitrogênio e potássio na produção do milho (Dibb & Thompson, 1985).



**Figura 118.** Relação N/K foliar e produção do milho (Faizy, 1979).

Uma explicação do efeito positivo da interação NxK na produção seria devido à maior eficiência de utilização do N na presença do K (Tabela 90).

Salienta-se, ainda, que a relação NxK adequada, além do aumento da produção, pode trazer outros benefícios:

1- Reduz o acamamento no milho (Tabela 91). Sabe-se que o K pode levar ao acúmulo maior quantidade de carboidratos nos colmos, beneficiando a produção de compostos orgânicos estruturais nos colmos.

2- Aumenta a qualidade de grãos (proteína), (Tabela 92). Uma possível explicação para as culturas com alto teor de proteína necessitarem (e exportarem) grande quantidade de K por meio dos grãos seria o envolvimento do K no transporte do N para a síntese protéica.

**Tabela 90.** Efeito de doses de potássio na eficiência da nutrição nitrogenada em plantas de milho (Bitzer, 1982)

K <sub>2</sub> O kg ha <sup>-1</sup>	Produção t ha <sup>-1</sup>	N-eficiência kg grão/100 kg N	N-total absorvido kg ha <sup>-1</sup>
0	8,4	4872	194
67	8,8	5208	204
134	10,4	6180	240

**Tabela 91.** Efeito do potássio e nitrogênio na taxa de acamamento da cultura do milho (Schulte, citado por Usherwood, 1982)

K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	N (kg ha <sup>-1</sup> )		
	0	90	180
Taxa de acamamento (%)			
0	9	57	59
75	4	3	8
150	4(3,7 t ha <sup>-1</sup> )	4 (7,7 t ha <sup>-1</sup> )	4 (8,1 t ha <sup>-1</sup> )

**Tabela 92.** Correlação entre teor de potássio na qualidade de grãos (teor de proteína) de soja, feijão, algodão e milho (Adaptado de Blevins, 1985)

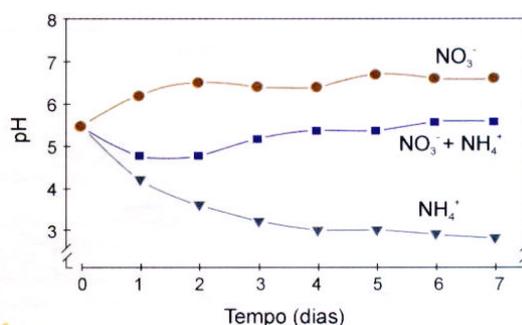
Semente	K <sup>+</sup>	Proteína bruta
	g kg <sup>-1</sup>	
Soja	18	380
Feijão	14	253
Algodão	12	231
Milho	3,3	90

Obs: teor de K x teor proteína: r=0,98

Estudos têm indicado os efeitos positivos do N especialmente na forma amoniacal, que provocam aumentos na absorção do P. Este fato pode ser explicado por duas teses:

- do P disponível do solo: a absorção do N, na forma amoniacal, diminui o pH da rizosfera, que por sua vez pode aumentar a disponibilidade de P (Figura 119). Além disso, o processo de absorção em si, é favorecido em pH baixo nas células da epiderme.
- do transporte de P na planta: tem-se um aumento da absorção e transporte do P na planta, visto que o amônio aumenta a taxa de dissociação do complexo fosfato-carregador no xilema, aumentando as concentrações de P na parte aérea. Salienta-se que a influencia do N na absorção de P ocorre mesmo em solo com alto teor de P, onde a adubação fosfatada não teria efeito na produção da planta (Tabela 93), (Santos et al., 1975).

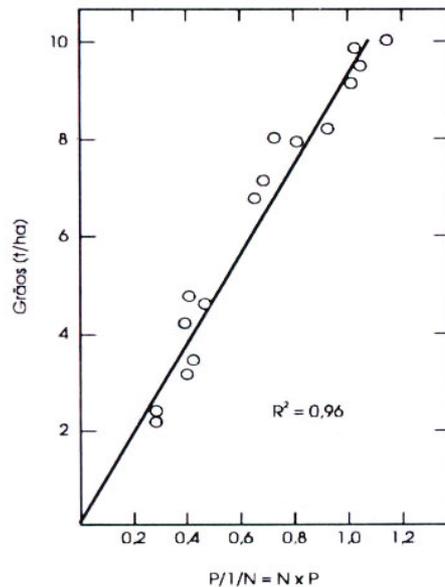
Dessa forma, estudos indicam que o N tem efeito sinérgico sobre o teor de P no tecido foliar e vice-versa, e de ter havido efeito interativo positivo na produção de grãos, sendo que o produto N e P de 1,0 no tecido foliar é que resultou na maior produção (Figura 120).



**Figura 119.** Variações do pH da solução externa quando o sorgo foi suprido exclusivamente ou combinado (amônio e nitrato) (N-total=300 mg/L) (Clark, 1982, citado por Marschner, 1995).

**Tabela 93.** Efeito de doses de nitrogênio sobre o teor de P na planta e na produção de grãos de milho (Santos, 1975).

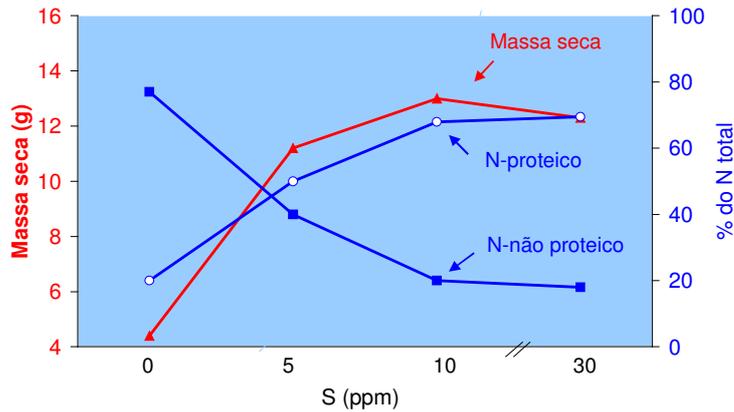
Dose de N kg ha <sup>-1</sup>	P na matéria seca %	Produção de grãos t ha <sup>-1</sup>
0	0,22	3,7
60	0,27	5,3
120	0,30	6,4



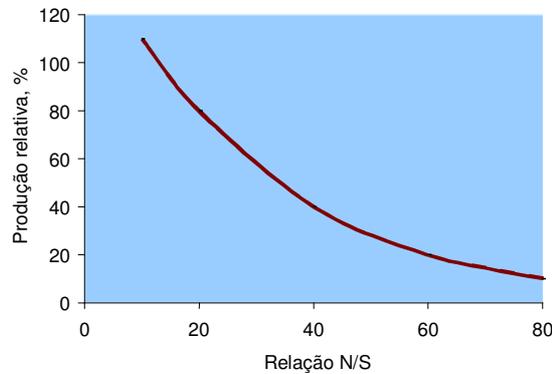
**Figura 120.** Relação entre produção de grãos de milho e o produto de N e P (NxP) contidos no tecido foliar (Sumner & Farina, 1986).

### b) Interação N e S

Como já visto, o N e o S são dois nutrientes básicos para a síntese de proteínas e um suprimento inadequado de um desses nutrientes acarreta desequilíbrio, resultando em prejuízo do produto colhido, além da produção. Isto pode ocorrer com doses elevadas de N, sem a aplicação de S. Portanto, o S é importante para incrementar a M.S., e o N protéico a redução do N (não-protéico) (Figura 121). Dados indicam que a máxima produção de M.S. de milho foi obtida quando a relação N/S no tecido se apresentava em torno de 11 (Stewart & Porter, 1969) (Figura 121).



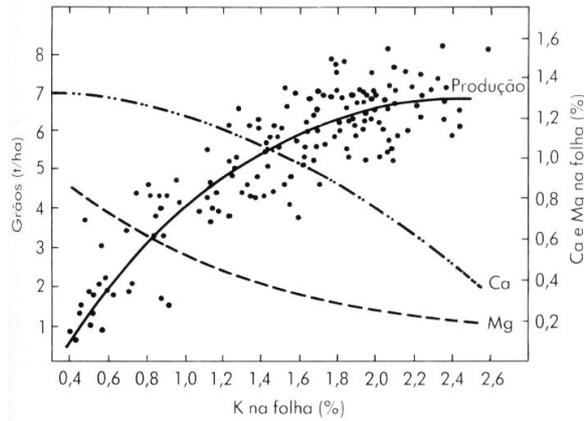
**Figura 121.** Produção de matéria seca e distribuição de N na parte aérea de plantas de milho, aos 35 dias após a germinação, em função de doses de S (Stewart & Porter, 1969).



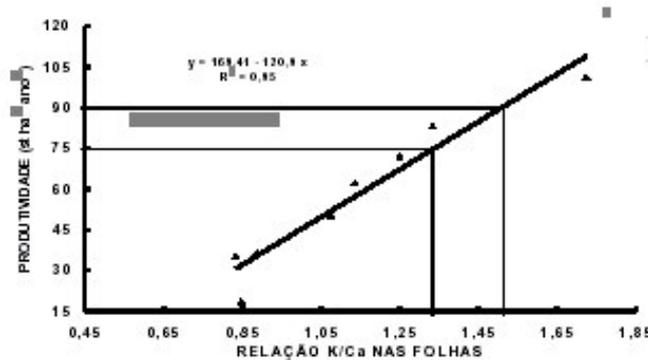
**Figura 122.** Efeito da relação N/S na produção de matéria seca da parte aérea de ‘rygrass’ (Adaptado de Jones et al., 1972)

**c) Interações K, Ca, Mg** O incremento das doses de K causam decréscimo nos teores de Ca e Mg que, em doses extremas, podem provocar queda da produção. Nesse sentido, teores foliares próximos de 1,8% de K, proporcionam diminuição aceitável de Ca e Mg foliar com produção satisfatória (Figura 123). Entretanto, níveis mais altos de K, levam à queda muito acentuada nos teores de Ca e Mg foliar, de forma que deve ser evitada no manejo da adubação potássica.

Acrescenta-se que a absorção preferencial de K é pelo fato de ele ser íon monovalente com menor grau de hidratação comparado aos divalentes. Por outro lado alto teor de Ca em relação ao K (baixa relação K/Ca) também pode estar associado à baixa produção em eucalipto (Figura 124). A relação foliar K/Ca, próxima de 1,5 foi a que proporcionou produção próxima da máxima.



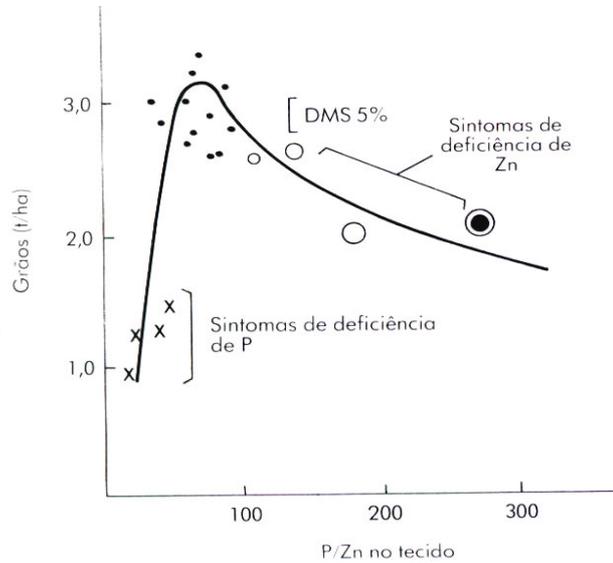
**Figura 123.** Relação dos teores foliar de K, Ca e Mg na cultura do milho (Adaptado de Loué,1963).



**Figura 124.** Efeito da relação K/Ca nas folhas do Eucalipto sobre a produtividade (Lençóis Paulista)

É comum associar a deficiência de Zn a altos níveis de P disponível no solo ou a adubações fosfatadas elevadas. Um experimento clássico da literatura, com fatorial N e Zn, indica que a baixa relação P/Zn está associada à baixa disponibilidade de P no solo e nas folhas, o que limita a produção; relações intermediárias, foram obtidas quando ambos os nutrientes foram aplicados no solo, resultando em alta produção de grãos; e, por fim, altas relações P/Zn foram obtidas com altas doses de P, sem a correspondente aplicação do Zn, levando à deficiência de Zn, o que resultou em queda na produção (Figura 125), (Summer & Faria, 1986).

A explicação da deficiência de Zn nas relações altas de P/Zn pode ser dada pelas reações de precipitação do P e Zn nos vasos condutores, reduzindo o transporte de Zn para a parte aérea, ou ainda, uma desordem metabólica causada pelo desequilíbrio entre os dois nutrientes.



**Figura 125.** Relação do P/Zn no tecido foliar e a produção de grãos de milho. O tamanho dos círculos indica a deficiência de Zn (Sumner & Farina, 1986).

Existem ainda, algumas indicações que o potássio poderá favorecer a absorção de P e de Zn, diminuindo a intensidade da interação P e Zn (Adriano, 1971).

#### d) Mg x Mn/Zn

Em experimentação com raízes destacadas de soja, com uso de radioisótopos, observou-se que o aumento das doses de Mg diminuiu a absorção de Mn e Zn, por inibição não-competitiva (Tabela 94), (Moreira et al., 2003).

**Tabela 94.** Absorção de  $^{65}\text{Zn}$  e  $^{54}\text{Mn}$  por raízes destacadas de soja (média quatro cultivares) sob doses crescentes de Mg (Moreira et al., 2003).

Mg mmol L <sup>-1</sup>	Zn	Mn
0	-	
3,0	63	32
6,0	72	60

<sup>(1)</sup>  $^{65}\text{Zn}$  e  $^{54}\text{Mn} = 2 \mu\text{mol L}^{-1}$

Diante da importância da relação entre nutrientes e a produção das culturas, existem indicações de relações adequadas para algumas culturas como no cafeeiro (Tabela 95).

**Tabela 95.** Relações entre nutrientes foliares considerados adequados para o cafeeiro<sup>1</sup> (Malavolta, 1996).

Relação	Faixas	Relação	Faixas
N/P	16-18	P/Cu	125-187
N/K	1,3-1,4	P/Zn	125-187
N/S	16-18	Ca/Mg	66-75
K/Ca	1,7-2,1	B/Zn	5,0-7,3
K/Mg	6,1-6,6	Cu/Zn	1
N/B	400-457	Fe/Mn	0,73-0,85
N/Cu	2000-3375		

#### e) S x Mo

O ânion sulfato pode promover diminuição da absorção do ânion molibdato. Essa diminuição da absorção de Mo pode afetar o metabolismo da planta provocando deficiência de N. Assim, a adubação com enxofre, a exemplo da gessagem, deve ser utilizada com critério para não induzir distúrbio nutricional na planta seja por deficiência de Mo e até de N.

#### f) N x P

A relação N x P, em cereais relacionado com maior produção esteve próxima de 7 (Duivenbooden et al.1996), e especificamente no arroz, Mkamilo (2004), verificou equilíbrio nutricional com relação N e P igual a 5,6. Sandras (2006), verificou em diversas culturas que a relação N e P foi importante para explicar a absorção de P, obtendo relação adequada de 5,6 e 8,7 para cereais e leguminosas, respectivamente.

Uma possível competição na absorção entre os ânions fosfato e nitrato foi considerada como fator de menor absorção do nitrogênio, em condições de alta concentração de P no substrato de cultivo de porta-enxertos cítricos, em fase de sementeira (Fontanezzi,1989).

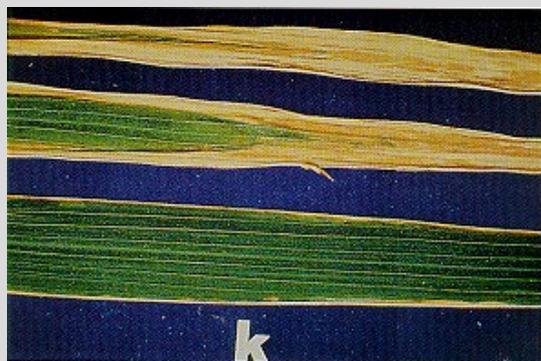
### **g) Outras interações**

Existem outras interações entre nutrientes que podem ocorrer, entretanto, são pouco estudadas. A interação P x B, pode ocorrer pois nível baixo de P pode interferir no metabolismo do B, agravando tanto os sintomas de deficiência ou excesso de B, em *Brassica campestris* L.(Sinhá et al., 2003).

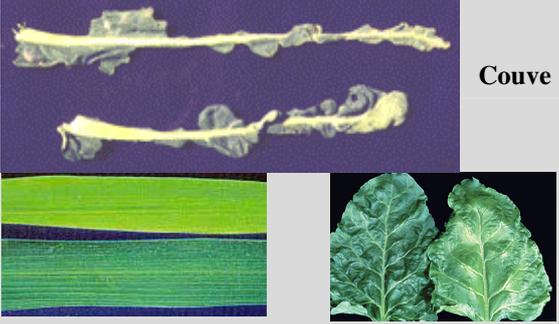
## Considerações finais

Dentro da ciência do solo, a área de nutrição de plantas é relativamente nova e, com isso, os desafios existem e são importantes para que o manejo da nutrição das culturas permita atingir a produção máxima econômica com uso racional dos nutrientes, respeitando o meio ambiente.

Para isso, é preciso duas ações simultâneas, no âmbito da extensão e da pesquisa. A primeira é para encorajar o uso da análise química de folhas pelos produtores como ferramenta de rotina para o manejo da nutrição e adubação das culturas; a segunda é intensificar pesquisas básicas e aplicadas em nutrição de plantas, como: a) ampliação da lista dos nutrientes de plantas; b) maior conhecimento dos mecanismos de absorção ativa e de transporte/redistribuição dos nutrientes nas plantas; c) ampliação de estudos interdisciplinares, abordando a Interface da microbiologia do solo/fitopatologia e nutrição de plantas; d) uso da biologia molecular e do melhoramento genético para codificar genes responsáveis pela tolerância aos excessos de Al e outros metais e baixo de bases, para a seleção de plantas adaptadas ao solo; e) estudos sobre a eficiência de utilização de nutrientes pelas plantas; f) estabelecer níveis adequados dos nutrientes na folha e critérios de amostragem de folhas em culturas pouco estudadas nas condições brasileiras.

**Outras fotos de desordem nutricional****a) Deficiências de macronutrientes em culturas****Foto 1. Nitrogênio (Soja)****Foto 2. Fósforo (Café)****Foto 3. Potássio (Arroz)****Foto 4. Cálcio (Tomate)****Foto 5. Magnésio (Algodão)****Foto 6. Enxofre (Trigo)**

b) Deficiências de micronutrientes em culturas

 <p><b>Café</b></p> <p><b>Citrus</b></p>	 <p><b>Feijão</b></p> <p><b>Mamão</b></p>
<p>Foto 7. Zinco</p>	<p>Foto 8. Boro</p>
 <p><b>Citrus</b></p> <p><b>Arroz</b></p>	 <p><b>Citrus</b></p> <p><b>Algodão</b></p>
<p>Foto 9. Manganês</p>	<p>Foto 10. Ferro</p>
 <p><b>Citrus</b></p> <p><b>Feijão</b></p>	 <p><b>Couve</b></p> <p><b>Arroz</b></p> <p><b>Beterraba</b></p>
<p>Foto 11. Cobre</p>	<p>Foto 12. Molibdênio</p>
 <p><b>Trigo</b></p>	
<p>Foto 13. Cloro</p>	

c) Toxidez de micronutrientes em culturas

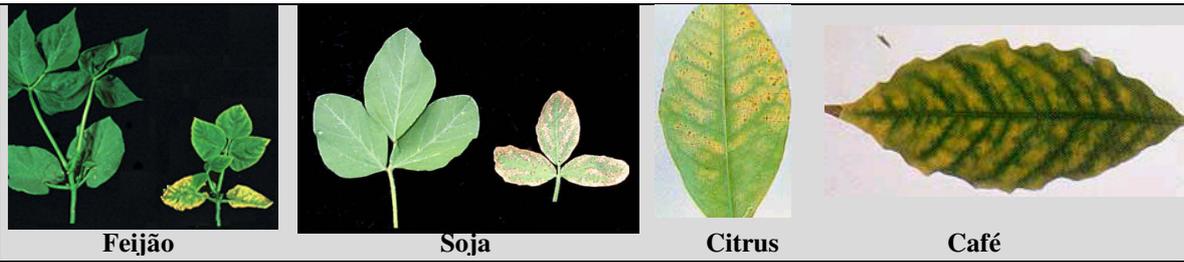
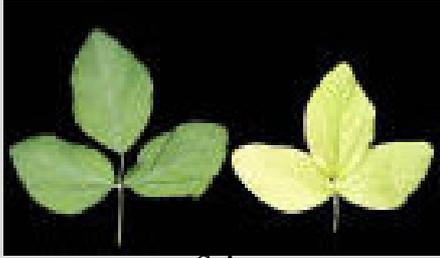


Foto 13. Boro

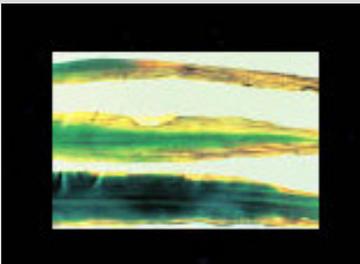


Soja



Sorgo

Foto 15. Zinco

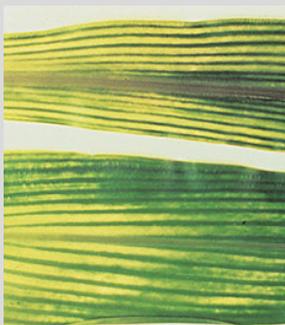


Sorgo



Soja

Foto 16. Ferro



Sorgo

Foto 17. Manganês



Tomate

Foto 18. Cobalto

Foto 19. Alumínio

## Conceitos gerais

**Absorção** - a entrada de um elemento, na forma iônica ou molecular, no espaço intercelular ou em qualquer outra parte da célula, podendo ser via radicular ou foliar.

**Adsorção, adsorver:** processo pelo qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de sólidos mediante interações de natureza química ou física.

**Amina:** classe nitrogenada de compostos orgânicos que se deriva da amônia pela substituição, total ou parcial, dos hidrogênios por radicais alquila ou arila.

**Aminoácido:** molécula orgânica que contém pelo menos um grupamento amina e um grupamento carboxila. São as unidades fundamentais das proteínas. Pode ser produzido sinteticamente, via fermentação e biotransformação, e são essenciais para um ser vivo.

**Apoplasto** - é o espaço entre as células vegetais, constituído pela parede celular.

**Biomassa:** (1) quantidade total de organismos vivos existentes em um determinado território e em dado momento. (2) a massa de matéria vegetal existentes nas florestas ou a matéria orgânica não fóssil de origem biológica. (3) qualquer matéria de origem vegetal, utilizada como fonte de energia, para adubação verde ou para proteger o solo da erosão.

**Carboidratos** - são as biomoléculas mais abundantes na natureza. Para muitos carboidratos, a fórmula geral é:  $[C(H_2O)]_n$ , daí o nome "carboidrato", ou "hidratos de carbono"

**Cinética enzimática** - é estudada avaliando-se a quantidade de produto formado ou a quantidade de substrato consumido por unidade de tempo de reação. Uma reação enzimática pode ser expressa pela seguinte equação:  $E + S \rightleftharpoons [ES] \rightleftharpoons E + P$

**Clorofilômetro:** medidor portátil que permite a obtenção de valores indiretos do teor de clorofila presente na folha de modo não destrutivo, rápido e simples.

**Clorose** - consiste na alteração da coloração das folhas, a exemplo do amarelecimento.

**Cobertura morta** - camada de resíduos de planta espalhada sobre a superfície do solo que o protege contra a ação dos raios solares, do impacto das chuvas e de outras formas de erosão. A cobertura morta ajuda manter a umidade do solo possibilitando o desenvolvimento de vida microbiana que efetua a decomposição da matéria orgânica liberando o nitrogênio e outros elementos químicos fundamentais ao desenvolvimento das plantas.

**Cofatores** - são pequenas moléculas orgânicas ou inorgânicas que podem ser necessárias para a função de uma enzima.

**Compostos orgânicos** - é a forma de adubo mais usada na agricultura orgânica. Resultam da mistura de substâncias que possuem o elemento carbono, como restos vegetais, esterco e outros materiais, orgânicos ou não.

**Condutividade elétrica (CE)** – é um indicativo da concentração de sais ionizados na solução.

**Consumo de luxo** - significa que após atingir a produção máxima, o aumento da concentração do nutriente na folha não vai mais resultar em acréscimo de produção.

**Cutícula** - camada de material de natureza cerosa (cutina), pouco permeável à água, revestindo a parede externa de células epidérmicas.

**Déficit hídrico** - resultado (negativo) do balanço hídrico em que o total de água que entra no sistema via precipitação é menor que a quantidade total de água perdida pela evaporação e pela transpiração pelas plantas.

**Desordem nutricional** – é um estado nutricional da planta que pode corresponder a uma deficiência ou toxidez, ou seja, quando o nutriente está em nível muito baixo ou muito alto na planta, respectivamente.

**Diagnose foliar** - consiste na avaliação do estado nutricional de uma planta por meio da análise química das folhas (ou parte) e comparando-a com seu padrão preestabelecido (lavoura com alta produção).

**Diagnose visual** - consiste na avaliação do estado nutricional de uma planta por meio da sintomatologia típica (exemplo de clorose/necrose nas folhas), de desordem nutricional seja por deficiência ou excesso que dependerá das funções que o nutriente desempenha nas plantas e também a sua mobilidade.

**Disponibilidade** - proporção de um nutriente que pode ser absorvido e utilizado pela planta para satisfazer as exigências nutricionais. É expressa em porcentagem.

**Drenos** - são órgãos que apresentam fotossíntese líquida negativa, dependem da importação de nutrientes para seu metabolismo. Ex: Durante a fase vegetativa os maiores drenos são raízes e ápices caulinares. Na fase reprodutiva os frutos se tornam dominantes.

**DRIS** (Sistema Integrado de diagnose e recomendação) - é um método de avaliação do estado nutricional da planta, em que a relação entre nutrientes é o aspecto mais importante para explicar a produção, de forma que se comparam índices calculados por meio das relações entre nutrientes.

**Elemento benéfico** - é definido como elemento que estimula o crescimento dos vegetais, mas que não são essenciais ou que são essenciais somente para certas espécies ou sob determinadas condições.

**Elemento tóxico** - aquele que não se enquadra como um nutriente ou elemento benéfico. Normalmente, são elementos que mesmo em concentrações baixas no ambiente podem apresentar alto potencial maléfico, acumulando-se na cadeia trófica e diminuindo o crescimento podendo levar à morte do vegetal. Como exemplo tem-se: Al, Cd, Pb, Hg, etc.

**Enzimas** - são proteínas com atividade catalítica, sendo que praticamente todas as reações que caracterizam o metabolismo celular são catalisadas por enzimas.

**Espaço livre aparente** (ELA= ELágua+ELD) – é composto refere-se ao espaço livre de água (ELágua= por onde se movem livremente a água e os solutos, com e sem cargas, conhecido por macroporos) e o espaço livre de Donnan (ELD – onde ocorre a troca de cátions e a repulsão de ânions, conhecido por microporos).

**Estresse hídrico** - (1) condição de tensão que altera o equilíbrio de um sistema ou de um organismo vegetal causada pelo não fornecimento ou pelo fornecimento inadequado de água, alterando, desta forma, seu desenvolvimento. (2) condição de limitação ao desenvolvimento da planta pela ausência ou fornecimento inadequado de água.

**Estresse nutricional** - é conhecido por desordem nutricional podendo ser desencadeado por diferentes condições: salinidade, sodicidade, toxidez de alumínio e de metais pesados, deficiências de macro e micronutrientes, relações com desequilíbrio nutricional, baixa fertilidade.

**Evapotranspiração** - soma da transpiração das plantas com a evaporação das superfícies, incluindo a do solo.

**Exigência nutricional** - representa a quantidade de nutrientes que uma determinada cultura extraí (ou retira) do solo (ou meio de crescimento qualquer), para atender a seu desenvolvimento vegetativo e reprodutivo.

**Exportação** - refere-se aos nutrientes levados da área agrícola mobilizados no produto da colheita.

**Exsudato** - líquido com alto teor de proteínas séricas e leucócitos, produzido como reação a danos nos tecidos e vasos sanguíneos.

**Faixa adequada/suficiência** - é uma faixa de concentração de nutriente na folha correspondente a 100% da produção máxima.

**Fertilizante** - substância natural ou artificial que contém elementos químicos e propriedades físicas que aumentam o crescimento e a produtividade das plantas, melhorando a natural fertilidade do solo ou devolvendo os elementos retirados do solo pela erosão ou por culturas anteriores.

**Fisiológico** - relativo ao estudo das funções e do funcionamento normal dos seres vivos, especialmente dos processos físico-químicos que ocorrem nas células, tecidos, órgãos e sistemas dos seres vivos saudáveis; biofisiologia.

**Folha diagnóstica (ou folha índice)** - é uma folha específica em determinada cultura que melhor reflete seu estado nutricional.

**Fome oculta** - representa a concentração de nutriente em nível de deficiência; entretanto, a mesma não está manifestando os sintomas visuais característicos.

**Fontes** - normalmente são órgãos que atingiram um grau de desenvolvimento que lhes permite absorver quantidades adequadas de água e nutrientes pela corrente transpiratória e ter uma fotossíntese líquida capaz de torná-los autotróficos. Ex: folhas expandidas e órgãos de reserva na fase em que estão exportando nutrientes (período de inverno, etc).

**Fotossíntese** - (1) conversão de energia luminosa em energia química a partir do dióxido de carbono na presença de clorofila, ou seja, assimilação do carbono pelos organismos clorofilados na presença de luz. (2) processo pelo qual a energia solar é usada para formar as ligações químicas que mantêm juntas as moléculas orgânicas. (3) processo biológico pelo qual a planta portadora de pigmento capaz de absorver a energia do solo converte água, sais minerais e gás carbônico em substância orgânica e oxigênio. (4) processo de partição da molécula de água, em que parte do hidrogênio, através de uma seqüência de reações, se combina com o carbono do gás carbônico, para formar substâncias orgânicas, ficando como subproduto oxigênio livre.

**Funções dos carboidratos** - fonte de energia; reserva de energia; estrutural; matéria prima para a biossíntese de outras biomoléculas.

**Hidroponia** - uma técnica alternativa de cultivo em que o solo é substituído por uma solução aquosa contendo elementos essenciais para o desenvolvimento da planta.

**Lei do mínimo (de liebig)**– refere-se ao fato de que a produção de uma planta é limitada pelo elemento mais escasso entre todos os nutrientes presentes no solo. Isto é, a produção fica limitada quando pelo menos um dos elementos necessários está disponível em quantidade inferior à requerida pela planta (nutriente limitante).

**Lipídios** - são biomoléculas insolúveis em água, e solúveis em solventes orgânicos; funções dos lipídios - Reserva de energia; combustível celular; componente estrutural das membranas biológicas; Isolamento e proteção de órgãos.

**Lixiviação:** processo pelo qual os elementos químicos do solo migram, de forma passiva, das camadas mais superficiais de um solo para as camadas mais profundas, em decorrência de um processo de lavagem devido à ação da água da chuva ou de irrigação, tornando-se indisponíveis para as plantas. Nas regiões de clima úmido, os solos tornam-se estéreis com poucos anos de uso, devido, em grande parte, aos efeitos da lixiviação. A lixiviação também ocorre em vazadouros e aterros de resíduos, quando são dissolvidos e carreados certos poluentes ali presentes para os corpos d'água superficiais e subterrâneos.

**Macronutrientes** - São os nutrientes que são absorvidos ou exigidos pelas plantas em maiores quantidades: N, P, K, Ca, Mg e S (expresso em  $\text{g kg}^{-1}$  de matéria seca).

**Marcha de absorção** - estuda a fase de desenvolvimento da cultura em que a mesma apresenta maior exigência em um determinado nutriente, ou seja, em qual fase tem-se a maior velocidade de absorção do nutriente.

**Metabolismo** - conjunto de reações químicas que acontecem dentro das células dos organismos vivos, para que estes transformem energia. Existem dois grandes processos metabólicos a **biossíntese** (conjunto das reações de síntese necessárias para o crescimento de novas células e a manutenção de todos os tecidos) e o **Catabolismo** (um processo contínuo, centrado na produção da energia necessária para a realização de todas as atividades físicas externas e internas, implicando também na quebra das moléculas químicas complexas em substâncias mais simples).

**Micronutrientes** - São os nutrientes que são absorvidos ou exigidos pelas plantas em menores quantidades: Fe, Mn, Zn, Cu, B, Cl e Mo (expresso em  $\text{mg kg}^{-1}$  de matéria seca).

**Mineralização:** processo de transformação de matéria orgânica em substâncias inorgânicas, que ocorre no solo, geralmente de forma lenta, a partir do qual retornam ao solo os nutrientes retirados pelas plantas.

**Mobilidade** – é considerado o movimento do nutriente dentro da planta, englobando o processo de transporte e de redistribuição do nutriente.

**NAD<sup>+</sup>** - é a forma oxidada do cofator e ele passa por uma reação de 2 elétrons reversível que produz NADH ( $\text{NAD}^+ + 2 \text{e}^- + \text{H}^+$ ).

**NAD<sup>+</sup>/NADH** - é um cofator orgânico associado com muitas enzimas dehidrogenases que catalizam reações redox.

**NADP** - é um composto que desempenha uma função redox na fotossíntese e na rota oxidativa das pentoses fosfato.

**Necrose** - consiste na morte da folha (secamento).

**Nitrificação** - transformação dos sais amoníacos encontrados nos solos em nitratos pelos organismos que nele vivem através da utilização da matéria orgânica nitrogenada.

**Nível crítico** - é uma dada concentração do nutriente na folha que abaixo desse valor, a produção é significativamente diminuída e, acima deste, a produção é pouco econômica.

**Nutrição de plantas** - é um ramo da ciência do solo que estudam quais são os elementos essenciais para o ciclo de vida da planta, como são absorvidos, translocados e acumulados, suas funções, exigências e os distúrbios que causam quando em quantidades deficientes ou excessivas.

**Nutriente** - é um elemento químico essencial às plantas, ou seja, sem ele a planta não vive.

**Nutriente biodisponível ou fitodisponível** - é um dado nutriente que está presente na solução do solo na forma iônica e pode se mover para a rizosfera.

**Oxidação** - (1) qualquer troca **química** que implica na adição de oxigênio ou seu equivalente químico. É um processo que se realiza de forma permanente nos solos, em geral por meio da hidratação de compostos ferrosos. (2) reação que, envolvendo um elemento químico, ocasiona perda de elétrons e conseqüente aumento de sua carga.

**Ph** - abreviação de "potencial hidrogeniônico", que é uma escala usada para medir a acidez ou a alcalinidade de soluções evitando o uso de expoentes, através da medida de concentração do íon hidrogênio em solução. É dado matematicamente como o logaritmo negativo da concentração de H<sup>+</sup>. O pH abaixo de 7 é **ácido**; acima de 7, alcalino; e 7 é considerado neutro.

**Plasmodesmo** - é um canal de ligação entre o citoplasma de células contíguas.

**Pressão radicular** - um fenômeno que se desenvolve nas plantas quando a transpiração é reduzida a uma taxa menor do que a taxa de entrada de água pelas raízes.

**Proteínas** - são formadas a partir da ligação em seqüência de apenas 20 aminoácidos, entretanto, existem, além destes aminoácidos principais, alguns aminoácidos especiais, que só aparecem em alguns tipos de proteínas. Assim as proteínas são macromoléculas mais abundantes nas células vivas e constituem 50% ou mais de seu peso seco. Elas se encontram em todas as células e em todas as partes das células

**Radiação solar** - conjunto de radiações emitidas pelo Sol que atingem a Terra e que se caracterizam por curto comprimento de onda.

**Redistribuição** - é a transferência do nutriente de um órgão ou região de residência para outro ou outra, em forma igual ou diferente da absorvida, predominantemente via floema.

**Respiração aeróbica** - é um processo biológico pelo qual compostos orgânicos reduzidos são mobilizados e oxidados de uma maneira controlada, de forma que a energia livre é liberada e incorporada na forma de ATP, que pode ser facilmente utilizado para a manutenção e desenvolvimento da planta.

**Salinidade** - medida de concentração de sais minerais dissolvidos na água.

**Senescência** - (1) falha geral de várias reações bioquímicas que precedem a morte celular - esta fase se estende da maturação completa até a morte. (2) que está em processo de envelhecimento.

**Solubilidade** - capacidade que uma substância tem de se dissolver num meio líquido.

**Suscetibilidade** - tendência ou predisposição de um organismo em sofrer os efeitos de um patógeno ou condições adversas.

**Tonoplasto** – é a membrana que envolve o núcleo das células.

**Transporte** - é a transferência do nutriente do local de absorção para outro qualquer dentro ou fora da raiz. (da raiz para a parte aérea, via xilema por exemplo, caso mais comum, embora possa ser via floema quando o nutriente é absorvido na folha e deslocado para outro órgão).

**Transporte à longa distância** - é a transferência do nutriente do xilema até a parte aérea, percorrendo longa distância.

**Transporte radial** - é a transferência do nutriente da epiderme até o xilema, caracterizando um transporte à curta distância, podendo ocorrer por dois caminhos; via apoplasto e/ou simplasto.

**Tratamento de sementes** - aplicação de produtos com o propósito de proteger a semente do ataque de pragas e patógenos ou melhorar a sua capacidade de produzir uma planta normal.

**Turgescência** - processo pelo qual uma célula (tecido ou órgão), ao absorver água, torna-se intumescida, por meio do aumento da pressão interna.

**Umidade relativa do ar** - (1) a razão, expressa em porcentagem, entre o conteúdo do vapor de água no ar e a pressão máxima do vapor de água à mesma temperatura. (2) quantidade de vapor de água contido no ar, medido em porcentagem, em relação ao máximo de vapor que aquele ambiente pode conter (saturação).

**Variabilidade genética** - quantidade da variação genética existente para uma determinada espécie.

**Vascular** - refere-se aos vasos do xilema (parte lenificada ou lenhosa do sistema vascular dos vegetais superiores) e do floema (o tecido condutor da seiva elaborada ou orgânica nos vegetais vasculares) da planta.

**Via simplasto** – refere-se ao transporte de solutos (ex. nutriente) através da membrana das células.

**Vigor** - característica genética que pode ser modificada fenotipicamente e que revela a capacidade de um organismo gerar produtos mais rapidamente e suportar significativas interferências do meio ambiente.

**Volatilização** - passagem de uma substância do estado sólido ou líquido para o estado gasoso.

## Referências

- ADATIA, M.H.; BESFORD, A.T. The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Ann. Bot.** v.58,p.343-351,1986.
- ADRIANO, D.C.; PAULSEN, G.M.; MURPHY, L.S. Phosphorus-iron and phosphorus-zinc relationships in corn seedlings as affected by mineral nutrition. **Agronomy Journal**, Madison,v.63,p.56-59,1971.
- ALI, N.A.; BERNAL, P.; ATER, M. Tolerance and bioaccumulation of copper in *Phragmites australis* and *Zea mays*. **Plant and Soil**, v.239,p.103-111,2002.
- ALLEN, M. The uptake of metallic ions by leaves of apples trees. II. The influence of certain anions on uptake from magnesium salts. **Journal of Horticultural Science**, v.35,p.127-135,1960.
- AMARAL, J.A.T., CORDEIRO, A.T. e RENA, A.B. Efeitos do alumínio, nitrato e amônio sobre a composição de metabólitos nitrogenados e de carboidratos em *Stylosanthes guianensis* e *S. macrocephala*. **Pesq. agropec. bras.**, v.35, n.2, p.313-320,2000.
- AMBERGER, A. **Pflanzenernährung: Ökologische und physiologische Grundlagen Dynamik und Stoffwechsel der Nährelemente**. Stuttgart: Eugen Ulmer, 3.ed. 264p.,1988.
- ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, 1999.156p.
- ATKINSON, C.J., MANSFIELD, T.A., McAINSH, M.R., et al. Interactions of calcium with abscisic acid in the control of stomatal aperture. **Biochemie und Physiologie der Pflanzen**, v.186, p.333-339, 1990.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995.414p.
- BARKER, A.V.; VOLK, R.J.; JACKSON, W.A. Root environment acidity as a regulatory factor in ammonium assimilation by the bean plant. **Plant Physiology**, v.41, n.7, p.1193-1199, 1966.
- BARTLETT, R.J. **Manganese redox reactions and organic interaction in soils**. In: GRAHAM, R.D.; HANNAM, R.J.; UREN, N.C. eds. Manganese in soils and plants. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher,1988.p.59-73.
- BATAGLIA, O.C.; MASCARENHAS, H.A.A. **Absorção de nutrientes pela soja**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1977.36p. (Boletim Técnico,41).
- BATAGLIA, O.C.; RODRIGUEZ, O.; HIROCE, R.; GALLO, J.R.; FURLANI, P.R.; FURLANI, A.M.C. Composição mineral de frutos cítricos na colheita. **Bragantia**, v.36,n.21,p.215-221,1977.
- BATAGLIA, O. C. ; Furlani, A.M.C. ; FURLANI, P. R. ; TEIXEIRA, J.P.F. ; GALLO, J. R.. **Métodos de Análise Química de Plantas**. Campinas, Instituto Agrônomo. Boletim Técnico 78. 48p.1983.
- BATAGLIA, O. C. ; QUAGGIO, J. A. ; SANTOS, W. R. ; ABREU, M.F. Diagnose nutricional do cafeeiro pelo DRIS variando-se a constante de sensibilidade dos nutrientes de acordo com a intensidade e frequência de resposta na produção. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 2, p. 253-263, 2004.
- BELOW, F.E. Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada no milho. **Informações agrônômicas**, n.99,p.1-6,2002.

- BERINGER, H.; TROLLDENIER, G. Influence of K nutrition on the response to environmental stress. In: **IPI. Potassium research - review and trends**. Bern: IPI, 1979. p.189-222.
- BITZER, M. No-till corn highest yield with nitrogen and potassium. **Better crops**, v.67,p.19,1982.
- BELOW, F.E. Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho. **Informações Agrônômica**, n.99,p.7-12,2002.
- BLEVINS, D.G. **Role of potassium in protein metabolism in plants**. In: MUNDSON, R.D. (ed.). Potassium in Agriculture. Madison: ASA/CSSA/SSSA,1985.p.413-424.
- BLEVIS, D.G.; LUKASZEWSKI, K.M. Boron in plant structure and function. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.49,p.481-500,1998.
- BOARETTO, R.M. **Boro (<sup>10</sup>B) em laranjeira: absorção e mobilidade**.Piracicaba. 120p. 2006. Tese (Doutorado) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP.
- BOARETTO, A. E. ; MURAOKA, T.; BOARETTO, R.M. Absorção e translocação de micronutrientes (<sup>65</sup>Zn, <sup>54</sup>Mn, <sup>10</sup>B), aplicados via foliar, pelos citros. **Laranja**, v. 24, n. 1, p. 177-198, 2003.
- BOARETTO, A.E.; TIRITAN, C.S.; MURAOKA, T. Effects of foliar applications of boron on citrus fruit and on foliage and soil boron concentration. In: BELL, R.W. & RERKASEM, B. (eds.). **Boron in Soils and Plants**. Kluwer Academic Publishers, 1997. p.121-123.
- BOGORAD, L. Chlorophyll biosynthesis. In: GOODWIN, T.W. (Ed.). **Chemistry and biochemistry of plant pigments**. New York : Academic, 1976. p.64-148.
- BOINK, A.; SPEIJERS, G. Health effects of nitrates and nitrites, a review. **Acta Horticulturae**, v.20,p.29-33,2001.
- BOLAÑOS, L.; BREWIN, N. J.; BONILLA, I. Effects of boron on rhizobium-legume cell-surface interactions and nodule development. **Plant Physiology**, Rockville, v. 110, p. 1249-1256, 1996.
- BOLLONS,H.M.;BARRACLOUGH, P.B. Inorganic orthophosphate for diagnosing the phosphorus status of wheat plants. **Journal of Plant Nutrition**,v.20,n.6,p.641-655,1997.
- BOLLONS,H.M.;BARRACLOUGH, P.B. Assessing the phosphorus status of winter wheat crops: inorganic orthophosphate in whole shoots. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge,v.133,p.285-295,1999.
- BRADFIELD, E.G.; GUTTRIDGE, C.G. Effects of night-time humidity and nutrient solution concentration on the calcium content of tomato fruit. **Scientia Horticulturae**, v. 22 , p. 207-217, 1984.
- BRENANN, R.F. Long-term residual value of copper fertiliser for production of wheat grain. **Australian Journal of Experimental Agriculture**,v. 46,n.1,p.77-83, 2006.
- BROWN, P.H.; HU, H. Manejo do boro de acordo com sua mobilidade nas diferentes culturas. **Informações Agrônômicas**, Piracicaba, v.84,p.13,1998.
- BROWN, P.H.; SHELPS, B. Boron mobility in plants. **Plant and Soil**, v.193,p.85-101,1997.

- BROWN, P.H.; WELCH, R.M.; CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for all higher plants. **Plant Physiol.**, v.85, p.801-803, 1987.
- BRUULSEMA, T. Potássio aumenta a produção de isoflavona na soja. **Informações agronômicas**, n.94, p.5, 2001.
- BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993.301p.
- CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, The Hague, v. 193, n. 1/2, p. 71-83, June 1997.
- CALVACHE, A.M., BERNARDI, A.C.C., OLIVEIRA, F.C. *et al.* Bioavaliação de estado nutricional do arroz (*Oryza sativa* L. var. IAC-165) e do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. var. carioca) utilizando 15N e 32P. **Sci. agric.**, v.51, n.3, p.393-398, 1994.
- CALVACHE, A.M.; REICHARDT, K. Efeito de épocas de deficiência hídrica na eficiência do uso do nitrogênio da cultura do feijão cv. imbabello. **Sci. agric.**, v.53, n.2-3, p.343-353, 1996.
- CAMMARANO, P., FELSANI, A., GENTILE, M. *et al.* Formation of active hybrid 80-S particles from subunits of pea seedlings and mammalian liver ribossomes. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.281, p.625-642, 1972.
- CARMELLO, Q.A.C.; ROSSI, F. **Hidroponia**: solução nutritiva – Manual. Viçosa: Centro de Produções Técnicas. 1997.56p.
- CARVALHO, A.J.C.; MARTINS, D.P.; MONERAT, P.H.; BERNARDO, S. Produtividade e qualidade do maracujazeiro amarelo em resposta à adubação potássica sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.21, p.333-337, 1999.
- CARVALHO, A.J.C.; MARTINS, D.P.; MONNERAT, P.H.; BERNARDO, S. Adubação nitrogenada e irrigação no maracujazeiro-amarelo. I. produtividade e qualidade dos frutos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.6, 2000.
- CARVALHO, L.H.; SILVA, N.M.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; KONDO, J.L.; CHIAVEGATO, E.J. Aplicação de boro no algodoeiro, em cobertura e em pulverização foliar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.265-269, 1996.
- CAZETTA, J.O. e VILLELA, L.C.V. Atividade da redutase do nitrato em folhas e caules de 'tanner grass' (*Brachiaria radicans* Napper). **Sci. agric.**, v.61, n.6, p.640-648, 2004.
- CERDA, A.; CARO, M.; SANTA CRUZ, F. Redistribucion de nutrientes en limonero verna determinados por un método indirecto. **Anales de Edafologia y Agrobiologia**, v.41, n.3, p.697-704, 1982.
- CHARTTERJEE, J.; CHARTTERJEE, C. Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower. **Environmental Pollution**, v. 109, p. 69-74, 2000.
- CLARK, R.B. **Sorghum**. In: BENNET, W.F. ed. Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. Saint Paul, APS Press/The American Phytopathological Society, 1993. p.21-26.

- COHEN, M.S.; LEPPER, R. Effects of boron on cell elongation and division in squash roots. **Plant Physiology**, v.59, p.884-887, 1977.
- COKE, L.; WHITTINGTON, W.J. The role of boron in plant growth. IV. Interrelationships between boron and Indol-3yl-acetic acid in the metabolism of bean radicles. **J. Exp. Bot.**, v.19, p.295-308.
- CONWAY, W.S.; SAMS, C.E. Calcium infiltration of Golden Delicious apples and its effect on decay. **Phytopathology**, Saint Paul, v.73, n.7, p.1068-1071, 1983.
- CORRALES, I.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Influence of silicon pretreatment on aluminium toxicity in maize roots. **Plant and Soil**, v.190, p.203-209, 1997.
- DELU FILHO, N.; OLIVEIRA, L.E.; ALVES, J.D.; SILVA, M.R.; PURCINO, A.A.C. **Enzimas de assimilação de nitrogênio em seringueira**. In: Relatório técnico anual do centro nacional de pesquisa de milho e sorgo 1992-1993. SILVA, A.F. (Coord.). Sete Lagoas: EMBRAPA/CNPMS, 1994. p.157-158.
- DIBB, D.W.; THOMPSON, JR., W.R. Interactions of potassium with other nutrients. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POTASSIUM IN AGRICULTURE, Atlanta, 1985. **Proceedings**. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1985, p.515-533.
- DIBB, D.W.; THOMPSON, JR., W.R. Corn growth as affected by ammonium vs. nitrate absorbed from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.68, p.89-94, 1976.
- DIEM, H.G.; DUHOUX, E.; ZAID, H.; ARAHOU, M. Cluster roots in Casuarinaceae: role and relationship to soil nutrient factors. **Annals of Botany**, v.85, p.929-936, 2000.
- DUIVENBOODEN, N.V., WIT, C.T.D., KEULEN, H.V. Nitrogen, phosphorus and potassium relations in five major cereals reviewed in respect to fertilizer recommendations using simulation modelling. **Fert. Res.** v.44, p.37-49, 1996.
- DROUX, M. Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: a survey. **Photosynthesis Research**, v.79, p.331-348, 2004.
- ENGVILD, K.C. Chlorine-containing natural compounds in higher plants. **Phytochemistry**, v.25, p.781-791, 1986.
- EPSTEIN, E. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. London, New York: John Wiley & Sons, 1972, 412p.
- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas e perspectivas**. MALAVOLTA, E. (Tradutor). São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1975. 344p.
- EPSTEIN, E. Photosynthesis, inorganic plant nutrition, solutions, and problems. **Photosynthesis Res.** v.46, p.37-39, 1995.
- ERGLE, D.R.; EATON, F.M. Sulfur nutrition of cotton. **Plant Physiology**, v.26, p.639-654, 1951.
- EVANS, H.J.; WILDES, R.A. Potassium and its role in enzyme activation. In: Proc. 8<sup>th</sup> Colloq. Int. Potash Inst. Bern, p.13-39, 1971.

- FAGERIA, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.2, n.2, p.119 - 246, 1998.
- FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.4, n.1, p.57 - 62, 2000b.
- FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.4, n.3, p.390 - 395, 2000c.
- FAGERIA, N.K. Eficiência do uso de potássio pelos genótipos de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.2115-2120, 2000a.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. **Rice**. In: FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C.; JONES, C.A. Growth and mineral nutrition of field crops. 2.ed. New York : M. Dekker, 1997. p.283-343.
- FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M. **Nutrição de fósforo na produção de arroz de terras altas**. In: Fósforo na agricultura brasileira, 1. YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S (Eds.). Piracicaba: POTAFOS, 2004.p.401-418.
- FAYAD, J.A., FONTES, P.C.R., CARDOSO, A.A.; FINGER, F.L.; FERREIRA, F.A. Absorção de nutrientes pelo tomateiro cultivado sob condições de campo e de ambiente protegido. **Hortic. Bras.** v.20, n.1, p.90-94, 2002.
- FAYZY, S.E.D.A. N-K interaction and the net influx of íons across corn roots as affected by different NPK fertilizers. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 14. Sevilla, 1979, **Proceedings**. Bern, International Potash Institute, 1979.p.409-416.
- FISCHER, R.A. Stomatal opening: role of potassium uptake by guard cells. **Science**, v.160, p.784-785, 1968.
- FLANERY, R.L. Exigências nutricionais do milho em estudo de produtividade máxima. **Informações Agronômicas**, n.37, p.6-7, 1987.
- FÖHSE, D.; CLAASEEN, N. & JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. **Plant Soil**, v.110, p.101-109, 1988.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I - External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil, Netherlands**, v.110, p.101-109, 1988.
- FONTANEZZI, G.B. da S. **Efeito de micorriza vesicular-arbuscular e de superfosfato simples no crescimento e nutrição de porta-enxertos de citros**. Lavras, 1989. 105p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) – ESAL.
- FONTES, P.C.R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: UFV, 2001.122p.
- FOY, C.D. Differential aluminium and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.28, n.2, p.150-155, 1976.

- FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F. (Ed.) **Soil acidity and liming**. 2.ed. Madison: Soil Science Society American, 1984. p.57-97.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Lancaster, v.29, p. 511-566, 1978.
- FOYER, C.; SPENCER, C. The relationship between phosphate status and photosynthesis in leaves and assimilate partitioning. **Planta**, v.167, p.369-375, 1986.
- FOX, T.C.; GUERINOT, M.L. Molecular biology of cation transport in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.49, p.669-696, 1998.
- FRANÇOIS, L.E.; DONAVAN, T.J.; MAAS, E.V. Calcium deficiency of artichoke buds in relation to salinity. **HortScience**, v. 26, n. 5, p. 549-553, 1991.
- FREIRE, M.F.; MONNERAT, P.H.; NOVÁIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição foliar: princípios e recomendações. **Informe Agropecuário**, v. 7, p. 54-62, 1981.
- FREITAS, F.A., KOPP, M.M., SOUSA, R.O.; ZIMMER, P.D.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Cienc. Rural**, v.36, n.1, p.72-79, 2006.
- FRIEDRICH, J.W.; SCHRADER, L.E. Sulfur deprivation and nitrogen metabolism in maize seedlings. **Plant Physiology**, Baltimore, v.61, n.6, p.900-903, 1978.
- GABELMAN, W.H. & GERLOFF, G.C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant Soil**, v.72, p.335-350, 1983.
- GAMA, M.V. Efeitos do azoto e do potássio na composição mineral do trigo "Impeto" e do tomate "Roma". **Agrografia Lusitana**, v.38, p.111-121, 1977.
- GARSED, S.G.; READ, D.J. Sulfur dioxide metabolism in soybean, *Glycine max* var. Beloxi – II: biochemical distribution of <sup>35</sup>SO<sub>2</sub> products. **New Phytologist**, Cambridge, v. 79, p. 583-592, 1977.
- GAO, X.; ZOU, C.; ZHANG, F.; ZEE, S.E.A.T.M.VAN DER; HOFFLAND, E. Tolerance to zinc deficiency in rice correlates with zinc uptake and translocation. **Plant and Soil**, v.278, n.1-2, p.253 – 261, 2005.
- GAUCH, H.G.; DUGGER JR., W.M. The role of boron in the translocation of sucrose. **Plant Physiol.**, v.28, p.457-466, 1953.
- GERLOFF, G. C. & GABELMAN, W. H. Genetics basis of inorganic plant nutrition. In: LAUCHLI, A. & BIELESKI, R. L. **Inorganic plant nutrition**. New York, Springer-Verlag, 1983. p.453-480.
- GOUSSAIN, M.M., MORAES, J.C., CARVALHO, J.G.; NOGUEIRA, L.N.; ROSSI, M.L. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J.E.Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotrop. Entomol.**, v.31, n.2, p.305-310, 2002.

- GRAHAM, R.D. **Breeding for nutritional characteristics in cereals**. In: TINKER, P.B.; LAUCHLI, A. (Ed.) *Advances in plant nutrition*. New York: Praeger, 1984. p.57-102.
- GREWAL, J.S.; SINGH, S.N. Effect of potassium nutrition on frost damage and yield of potato plants on alluvial soils of the Punjab (India). **Plant Soil**, v.57, p.105-110, 1980.
- GRIS, E.P., CASTRO, A.M.C. e OLIVEIRA, F.F. Produtividade da soja em resposta à aplicação de Molibdênio e inoculação com *Bradyrhizobium japonicum*. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.29, n.1, p.151-155, 2005.
- GRIMME, H. Soil factors of potassium availability. In: INDIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE. **Potassium in Soils, crop and fertilizers**. New Delhi, 1976, p.144-163. (Bolletim, 10).
- GROVE, L.T. **Nitrogen fertility in Oxisols and Ultisols of the humid tropics**. Ithaca. Cornell University, 1979. 27p. (Cornell International Agricultural Bulletin, 36).
- GUIDI, L.; LOREFICE, G.; PARDOSSI, A.; MALORGIO, F.; TOGNONI, F.; SOLDATINI, G.F. Growth and photosynthesis of *Lycopersicon esculentum* (L.) plants as affected by nitrogen deficiency. **Biologia Plantarum**, Prague, v.40, p.235-244, 1998.
- GUIMARAES, T.G., FONTES, P.C.R., PEREIRA, P.R.G.; ALVAREZ V., V.H.; MONNERAT, P.H. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivados em dois tipos de solo. **Bragantia**, v.58, n.1, p.209-216, 1999.
- GUPTA, U.C. **Copper in crop and plant nutrition**. In: RICHARDSON, W.H. ed. *Handbook of copper compounds and applications*. New York, Marcel Dekker, 1997. p.203-229.
- HAEDER, H.E., MENGEL, K. The absorption of potassium and sodium in dependence on the nitrogen nutrition level of the plant. **Landw. Forsch.**, v.23, n.1, p.53-60, 1969.
- HAFNER, H.; NDUNGURN, B.J.; BATIONO, A.; MARSCHNER, H. Effects of nitrogen, phosphorus and molybdenum application on growth and symbiotic N<sub>2</sub> fixation of groundnut in an acid sandy soil in Niger. **Fertilizer Research**, v.31, p.69-77, 1992.
- HAGEMAN, R.H.; BELOW, F.E. Role of nitrogen metabolism in crop productivity. In: ABROL, Y.P. (Ed.). **Nitrogen in higher plants**. Taunton: Research Studies, 1990. p.313-334.
- HAYNES R.; GOH, K.M. Ammonium and nitrate nutrition of plants. **Biol. Rev.** v.53, p.465-510, 1978.
- HANLON, E.A., OBREZA, T.A., ALVA, A.K.. **Tissue and soil analysis**. In: TUCKER, D.P.H., ALVA, A.K., JACKSON, L.K., WHEATON, T.A. (Eds.), Univ. of Florida, Coop. Extension Ser. Bull. No. SP169, Gainesville, FL, pp. 13-16, 1995.
- HANSON, E.J.; BEGGS, J.L.; BEAUDRY, R.M. Applying calcium chloride postharvest to improve highbush blueberry firmness. **HortScience**, Alexandria, v.28, n.10, p.1033-1034, 1993.
- HASLETT, B.S.; REID, R.J.; RENGEL, Z. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. **Annals of Botany**, v.87, p.379-386, 2001.
- HENDRICH, R., BUSCH, H. E RASCHKE, K. Ca<sup>2+</sup> and nucleotide dependent regulation of voltage dependent anion channels in plasma membrane of guard cells. **Embo J.**, v.9, p.3889-3892, 1990.

- HIRSCH, R.E. LEWIS, B.D.; SPALDING, E.P.; SUSSMAN, M.R. A role for the AKTI potassium channel in plant nutrition. **Science**, v.280,p.918-921,1998.
- HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soils**. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 347p.
- HOLLAND, D. A.; LITTLE,R.C.; ALLEN, M.; DERMOTT, W. Soil and leaf sampling in apple orchards. **J. Hort. Sci.** v.42,p.403-417, 1967.
- HÖMHELD, V. Efeitos do potássio nos processos da rizosfera e na resistência das plantas a doenças. In: In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L.Eds. POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA.. Piracicaba: POTAFÓS, 2005,p.301-319.
- HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. **Soil Science Plant Nutrition**,v.34,p.65-73,1988.
- HU, H.; BROWN, P H; LABAVITCH, J.M. Species variability in boron requirement is correlated with cell wall pectin. **J. Exp. Bot.** v.47, 227–232, 1996.
- HU, H.; BROWN, P. H. Absorption of boron by plants roots. In: DELL, B.; BROWN, P. H.; BELL, R. W. (Eds.). **Boron in soils and plants: reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. p. 49-58.
- JACKSON, P.C.; HAGEN, C.E. Products of orthophosphate absorption by barley roots. **Plant Physiology**, v.35,p.326-332,1960.
- JENSEN, M.H.; COLLINS, W.L. Hydroponic vegetable production. **Horticultural Reviews**, v.7,p.483-557,1985.
- JONGRUAYSUP, S.; DELL, B.; BELL, R.W. Distribution and redistribution of molybdenum in black gram (*Vigna mungo* L. Hepper) in relation to molybdenum supply. **Ann. Bot.**,v.73,p.161-167,1994.
- JONES Jr., J.B. **Plant nutrition manual**. Boca Raton: CRC Press. 1998. 147p.
- JO, J. et al. Isolation of ALU1-P gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from arthrobacter viscosus. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Korea, v.239, n.3, p.835-839, 1997.
- KARABOURNIOTIS, G.; TZOBANOGLOU, D.; NIKOLOPOULOS, D.; LIAKOPOULOS, G. Epicuticular phenolics over guard cells: exploitation for in situ stomatal counting by fluorescence microscopy and combined image analysis. **Annals of Botany**, v.87,p.631-639,2001.
- KEENEY, D.R. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. In: STEVENSON, F.J. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Agron. Manogr., 22. Madison: American Society of Agronomy, 1982.p.605-649.
- KHAN, M.J.;KHAN, M.H.; KHATTAK, R.A.; JAN, M.T. Response of maize to different levels of sulfur. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**,v.37,n.1-2,p.41-51,2006.
- KHURANA, N.; CHATTERJEE, C. Influence of variable zinc on yield, oil content, and physiology of sunflower. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**,v.32,n.19-20,p.3023-3030,2001.

- KORNDORFER, G.H., SNYDER, G., ULLOA, M., POWEL, J., DATNOFF, L.E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, v.24, n.7, p.1071-1084, 2001.
- KORNDORFER, G.H., PEREIRA, H.S., CAMARGO, M.S. Papel do silício na produção da cana-de-açúcar. **STAB - Açúcar Alcool e Subprodutos**. Piracicaba: , v.21, n.1, p.6-9, 2002.
- LAGATU, H.; MAUME, L. Le diagnostic foliaire de la pomme de terre. **Annales de l'École Nationale d'Agriculture**, Montpellier, v.22, p.50-158, 1934.
- LAUHLI, A. Soil science in the next twenty five years: does a biotechnology play a role? **Soil Science Society of America Journal**, v.51, p.1405-1409, 1987.
- LADHA, J.K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, T.J.; SIX, J.; KESSEL, C. van. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, v.87, p.85-156, 2005.
- LEHR, J.J. Sodium as a plant nutrition. **Journal of the Science of food and agriculture**, London, v.4, p.n.10, p.460-471, 1953.
- LENOBLE, M.E.; BLEVINS, D.G.; MILES, R.J. Boro extra mantém crescimento radicular sob condições de alumínio tóxicos. **Informações Agronômicas**, n.92, p.3-4, 2000.
- LI, B.; McKEAND, S.E. & ALLEN, H.L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **For. Sci.**, v.37, p.613-626, 1991.
- LIMA FILHO, O.F. **Calibração de boro e zinco para o cafeeiro** (*Coffea arabica* L. cv. catuaí amarelo). Piracicaba. 100p. 1991. Dissertação (Mestrado)- Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP.
- LOUÉ, A. Contribuição para o estudo da nutrição catiônica do milho, principalmente a do potássio. **Fertilité**, Paris, v.20, p.1-57, 1963.
- LOUÉ, A. **Oligoelements en agriculture**. Paris: SCPA Nathan, 1993. 577p.
- LUCAS, R.E.; KNEZEK, B.D. Climatic and soil conditions promoting micronutrient deficiencies in plants. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison : Soil Science Society of America, 1972. Cap.12, p.265-288.
- MACHADO, C.T.de T. e FURLANI, A.M.C. Cinética de absorção de fósforo e morfologia radicular de variedades locais e melhoradas de milho. **Sci. agric.**, v.61, n.1, p.69-76, 2004.
- MACHADO, C.T.T.; GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; MACHADO, A.T. Variabilidade entre genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo. **Bragantia**, v.58, p.109-124, 1999.
- MACKAY, A.D.; BARBER, S.A. Soil moisture effects on potassium uptake by corn. **Agronomy Journal**, v.77, n.4, p.524-527, 1985b.
- MACKAY, A.D.; BARBER, S.A. Soil moisture effects on root growth and phosphorus uptake by corn. **Agronomy Journal**, v.77, n.4, p.519-523, 1985a.
- MAGALHÃES, J.V. **Absorção e translocação de nitrogênio por plantas de milho** (*Zea mays* L.) submetidas a períodos crescentes de omissão de fósforo em solução nutritiva. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996, 76p.

- MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas**: amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992.124p.
- MALAVOLTA, E. Potássio: absorção, transporte e redistribuição na planta. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L.Eds. **POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**.. Piracicaba: POTAFÓS, 2005.p.179-238.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.251p.
- MALAVOLTA, E. **Informações agronômicas sobre nutrientes para as culturas** – Nutri-fatos. Piracicaba: POTAFOS.1996.12p. (Arquivo do Agrônomo, 10).
- MALAVOLTA, E. **O potássio e a planta**. Piracicaba: POTAFÓS,1984. 61p. (Boletim Técnico, 1).
- MALAVOLTA, E.; CROCOMO, O.J. **O potássio e a planta**. In: **POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, Londrina, 1982. Anais. Piracicaba, POTAFÓS,1982.p.95-162.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFÓS, 1989,201p.
- MOLASSIOTIS, A.; TANOU, G.; DIAMANTIDIS, G.; PATAKAS A.; THERIOS, I. Effects of 4-month Fe deficiency exposure on Fe reduction mechanism, photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and antioxidant defense in two peach rootstocks differing in Fe deficiency tolerance. **Journal of Plant Physiology**,v.163,n.2,p.176-185,2006.
- MANN, E.N., RESENDE, P.M., MANN, R.S. Efeito da aplicação de manganês no rendimento e na qualidade de sementes de soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**,v.37, n.12, p.1757-1764,2002.
- MANSFIELD, T.A., HETHERINGTON, A.M., ATKINSON, C.J. Some aspects of stomatal physiology. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, v.41, p.55-75, 1990.
- MARENCO, R.A.; LOPES, N.F. **Fisiologia vegetal**: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. Viçosa: UFV, 2005. 451p.
- MARINHO, M.L. **Respostas das culturas aos micronutrientes ferro, manganês e cobre**. In: BORKET, C.M.; LANTMANN, A.F. (ed.). Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira. Londrina: EMBRAPA/CNPSo/IAPAR/SBCS. 239-264p.1988.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London: Academic Press, 1995.889p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1986.674p.
- MARSCHNER, H. Functions of mineral: micronutrients. In: MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2a ed. San Diego: Academic Press, 1997. p.313-404.
- MASCAGNI Jr.H.J.; COX, F.R. Evaluation of inorganic and organic manganese fertilizer sources. **Soil Science Society of American Journal**, Madison,v.49,p.458-461,1985.
- MATOH, T.; KAIRUSMEE, P.; TOKAHASHI, E. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect on silicate. **Soil Science Plant Nutrition**,v.32,p.295-304, 1986.
- McSWAIN, B.D., TSUJIMOTO, H.Y., ARNON, D.I. Effects of magnesium and chloride ions on light-induced electron transport in membranes fragments from a blue-green alga. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.423, p.313-322, 1976.

- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Worblaufen-Bern: International Potash Institute, 1987.687p.
- MKAMILO, G.S. Maize–sesame intercropping in southeast Tanzania: farmers’ practices and perceptions, and intercrop performance. Tropical resource management Papers, No. 54. Wageningen University, Wageningen.,2004.
- MIELNICZUK, J. & SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. **R. Bra. Ci. Solo**, v.2,p.115-120, 1978.
- MIMURA, T., DIETZ, K.-J., KAISER, W., SCHRAMM, M.J., KAISER, G.E.; HEBER, U. Phosphate transport across biomembranes and cytosolic phosphate homeostasis in barley leaves. **Plant**, v.180, p.139-146, 1990.
- MIYAKE, Y.; TAKAHASHI. Effect of silicon on the growth of soybean plants in solution culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.31, p.625-636,1985.
- MOCQUOT, B.; VANGRONVELD, J.; CLIJSTERS, H.; MENCH, M. Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 182, p.287-300, 1996.
- MONTEIRO, F.A.; CARRIEL, J.M.; MARTINS, L.; CASTRO, J.V.; LIEM. T.H. Aplicação de níveis de enxofre, na forma de gesso, para cultivo de leguminosa forrageiras. **B. Industr. anim.**, Nova Odessa, v.40,p.229-240,1983.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; HEINRICHS, R.; TANAKA, R.T. Influencia do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38,n.1,p.95-101,2003.
- MORGAN,P.W. Effects of abiotic stresses on plant hormone systems. In **Stress responses in plants: adaptation and acclimation mechanisms**. Willey-Liss. Ed. 1990. Chapter 6. p. 113-146.
- NAMBIAR, P.T.C.; REGO, T.J.; RAO, B.S. Nitrate concentration and nitrate reductase activity in the leaves of three legumes and three cereals. **Annals of applied Biology**,v.112,n.3,p.547-553,1988.
- NATALE, W.; PRADO, R.M.; CORRÊA, M.C.M.; SILVA, M.A.C.; PEREIRA, L. Resposta de mudas de goiabeira à aplicação de zinco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 3, p. 770-773, 2002.
- NATALE, W.; PRADO, R.M.; MÔRO, F.V. Alterações anatômicas da parede celular de frutos de goiabeira induzidas pelo cálcio.. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.12, p.1239-1242, 2005.
- NEIVA, L.C.S. **Influência do potássio sobre a economia de água de quatro cultivares de arroz submetidos a déficit hídrico**. 1977. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1977.
- NICOLOSO, F.T.; SARTORI,L.; JUCOSKI, G.O.; ABREU, L.S.; CERVI, F.G. Fontes de nitrogênio mineral ( $N-NO_3^-$  e  $N-NH_4^+$ ) no crescimento de mudas de grápia (*Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbride).**Ciência Rural**, v.15,n.3,p.221-231,2005.

- NOLLER, C.H. RHYKERD, C.L. Relationship of nitrogen fertilization and chemical composition of forage to animal health and performance. In: MAYS, D.A. (Ed.). **Forage fertilization**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. cap.17,p.363-387.
- NUNES, F. N., NOVAIS, R. F., SILVA, I. R. *et al.* Fluxo difusivo de ferro em solos sob influência de doses de fósforo e de níveis de acidez e umidade. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.28, n.3, p.423-429,2004.
- OLIVEIRA JR., J.A. de, REGO, I.C., SCIVITTARO, W.B. *et al.* Sources and additive effects on <sup>35</sup>S foliar uptake by bean plants. **Sci. agric.**, v.52,n.3, p.452-457,1995.
- OLIVER, S.; BARBER, S.A. Mechanisms for the movement of Mn, Fe, B, Cu, Zn, Al and Sr from the soil to the soil to the surface of soybean roots. **Soil Science Society of American Proceedings**, Madison, v.30,p.468-470,1966.
- PALIYATH, F., THOMPSON, J.E. Calcium and calmodulin regulated break-down for phospholipid by microsomal membranes from bean cotyledons. **Plant Physiology**, v.83, p.63-68, 1987.
- PAPADAKIS, I.E.; DIMASSI, K.N.; BOSADALIDIS, A.M.; THERIOS, I.N.; PATAKAS, A.; GIANNAKOULA, A. Effects of B excess on some physiological and anatomical parameters of 'Navelina' orange plants grafted on two rootstocks. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford,v.51,n.3,p.247-257,2004.
- PARDES, F.L. & PRIMO-MILLO, E. 1988. **Normas para la Fertilización de los Agrios**. Fullets Divulgació nº 5-88. Generalitat Valenciana. IVIH. 28 p.
- PARKER, M.B.; GAINES, T.P.; WALKER, M.E.; PLANK, C.O.; DAVIS-CARTER, J.C. Soil zinc and pH effects on leaf zinc and the interaction of the leaf calcium and zinc on zinc toxicity of peanuts. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.21,p.2319-2332,1990.
- PEASLEE, D.E.; MOSS, D.N. Photosynthesis in K and Mg-deficient maize (*Zea mays* L.) leaves. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison,v.30,p.220-223,1966.
- PFLÜGER, R.E.; WIEDEMANN, R.D.E.R. Einfluss monovalenter kationen auf die nitratreduktion von *Spinacia oleracea* L. **Z Pflanzenphysiol**,v. 85, 125-133, 1977.
- PIERCE, J. Determinants of substrate specificity and the role of metal in the reaction of ribulosebiphosphate carboxylase/oxygenase. **Plant Physiology**, v.81, p.943-945, 1986.
- PILBEAM, D.J.; KIRKBY, E.A. The physiological role of boron in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.6, n.7, p.563-582, 1983.
- PORTIS JUNIOR, A.R., HELDT, H.W. Light-dependent changes of the Mg<sup>2+</sup> concentration in the stroma in relation to the Mg<sup>2+</sup> depending of CO<sub>2</sub> fixation in intact chloroplasts. **Biochimica et Biophysica Acta**, v.449, p.434-446, 1976.
- POLIDORO, J.C.; MEDEIROS, A.F.A.;XAVIER, R.P.; MEDEIROS, J.A.; BODDEY, R.M.; ALVES, J.R.; URQUIAGA, S. Evaluation of techniques for determination of molybdenum in sugarcane leaves. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.37, n.1-2,p.77-91,2006.

- PRADA, F.; MENDONÇA JR., C.X.; CARCIOFI, A.C. Concentração de cobre e molibdênio em algumas plantas forrageiras do Estado do Mato Grosso do Sul. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v.35,p.275-278,1998.
- PRADO, R.M. **Efeito da aplicação de calcário no desenvolvimento, estado nutricional e produção de frutos de goiabeira e de caramboleira durante três anos em pomares em implantação**. Jaboticabal, 2003, 68p. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.
- PRADO, R.M., FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na taxa de folhas senescentes da cultura da cana-de-açúcar. **Revista de Agricultura**, v.75,n.3,p.311-321,2000.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n. 1, p. 83-90, 2001.
- PRADO, R.M.; NATALE, W. Leaf sampling in carambola trees. **Fruits**, Paris, v.52,n.4,p.281-289,2004.
- PURITCH, G.S.; BARKER, A.V. Structure and function of tomato leaf chloroplasts during ammonium toxicity. **Plant Physiology**, v.42, n.7, p.1229-1238, 1967.
- RAFIQUE, E.;RASHID, A.; RYAN, J.;BHATTI, A.U. Zinc deficiency in rainfed wheat in pakistan: magnitude, spatial variability, management, and plant analysis diagnostic norms. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.37,n.1-2,p.181-197,2006.
- RAGHOTHAMA, K.G. Phosphate acquisition. **Ann. Rev. Pl. Physiol Pl. Mol. Biol.**, v.50, p.665-693, 1999.
- RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. eds. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2ed. Campinas, Instituto Agrônômico & Fundação IAC, 1996.285p.
- RAMALHO, J.C., REBELO, M.C., SANTOS, M.E., et al. Effects of calcium deficiency in *Coffea arabica*. Nutrients changes and correlation of calcium levels with some photosynthetic parameters. **Plant and Soil**, v.172, p. 87-96, 1995.
- RAMON, A.M.; CARPENA-RUIZ, R.O.; GARATE, A . BEUSICHEN, M.L-van. The effects of short term deficiency of boron on potassium, calcium and magnesium distribution in leaves and roots of tomato (*Lycopersicon esculentum*) plants. **Developments in Plant and Soil Science**, v.21, p.287-90, 1990.
- RANJITH, S.A.; MEINZER, F.C.; PERRY, M.H.; THOM, M. Partitioning of carboxylase activity in nitrogen-stressed sugarcane and its relationship to bundle sheath leakiness to CO<sub>2</sub>, photosynthesis and carbon isotope discrimination. **Australian Journal Plant Physiology**, v.22, p.903-911, 1995.
- RAO, I.M., FREDEEN, A.L.; TERRY, N. Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet. III. Diurnal changes in carbon partitioning and carbon export. **Plant Physiol.** v.92,p.29-36, 1990.
- REDDY, A.S.N. Calcium: silver bullet in signalling. **Plant Science**, v.160, p.381-404, 2001.

- RITCHEY, K.D. **Residual zinc effects**. Agronomic-economic research on tropical soils: Annual report for 1976-1977. Raleigh. Soil Science Department, North Carolina State University, 1978, p.113-114.
- ROSOLEM, C.A.; SILVA, R.H.; ESTEVES, J.A.F. Suprimento de potássio a raízes de algodoeiro em razão da adubação potássica e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n.5, p.635-641, 2003.
- ROSOLEM, C.A.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Absorção de uréia via foliar pelo algodoeiro em função do pH da solução. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.25, p.491-497, 1990.
- ROSOLEM, C.A.; GIOMMO, G.S.; LAURENTI, R.L.B. Crescimento radicular e nutrição de algodoeiro em resposta a calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.827-833, 2000.
- RUFTY Jr., T.W.; HUBER, S.C.; VOLK, R.J. Alterations in leaf carbohydrate metabolism in response to nitrogen stress. **Plant Physiology**, Bethesda, v.88, p.725-730, 1988.
- RUIZ, J.M.; RIVERO, R.M.; ROMERO, L. Boron increases synthesis of glutathione in sunflower plants subjected to aluminum stress. **Plant and Soil**, v. 279, n.2, p. 25-30, 2006.
- SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. **Plant physiology**, 4. ed. Belmont, CA: Wadsworth Publishing, 1992. 682p.
- SADRAS, V.O. The N:P stoichiometry of cereal, grain legume and oilseed crops. **Field Crops Research**, v.95, p.13-29, 2006.
- SANTOS, H.L.; BAHIA FILHO, A.F.C.; BAHIA, F.; MAGNAVACA, R.; SILVA, J.; MURAD, A.M.; PACHECO, E.B. Ensaio de adubação com nitrogênio, fósforo e potássio na cultura do milho em Minas Gerais. II. Avaliação da nutrição do milho pela análise foliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.10, p.47-51, 1975.
- SANTOS, O.S.dos. **Hidroponia da alface**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 2000. 160p.
- SANTOS, J.H.S. Proporções de nitrato e amônio na nutrição e produção dos capins aruana e marandu. Dissertação (Mestrado). 2003. 92p. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- SATTER, R.L.; MORAN, N. Ion channel in plant cell membranes. **Physiologia Plantarum**, v.72, p.816-820, 1988.
- SCHACHTMAN, D.P.; REID, R.J.; AYLING, S.M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, v.116, p.447-453, 1998.
- SCOTT, J.J. E LOEWUS, F.A. A calcium-activated phytase from pollen of *Lilium longiflorum*. **Plant Physiol.**, v.82, p.333-335, 1986.
- SHELP, B.J. Boron mobility and nutrition in brocoli (*Brassica oleracea* var. italica). **Annals of Botany**, Oxford, v.61, p.83-91, 1988.
- SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilisation index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilisation efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.4, p.289-302, 1981.
- SILVA, D.J., VENEGAS, V.H.A. e RUIZ, H.A. Transporte de enxofre para as raízes de soja em três solos de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.8, p.1161-1167, 2002.

- SILVA, E. T.; MELO, W. J. Atividade de proteases e disponibilidade de nitrogênio para laranjeira cultivada em Latossolo Vermelho distrófico. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.28, n.5, p.833-841,2004.
- SILVA, E.B., NOGUEIRA, F.D.; GUIMARAES, P.T.G. Uso do DRIS na avaliação do estado nutricional do cafeeiro em resposta à adubação potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.2, p.247-255,2003.
- SILVA, J.V., LACERDA, C.F., COSTA, P.H.A. et al. Physiological responses of NaCl stressed cowpea plants grown in nutrient solution supplemented with CaCl<sub>2</sub>. **Braz. J. Plant Physiol.**, v.15, n.2, p.99-105,2003.
- SILVA, D.H.CONTIN, T.L.M.; BOARETTO, R.M.; FERNANDES, H.M.G.; BOARETTO, A.E. Variação do pH de solução nutritiva em cultivo de laranjeira “valencia” enxertada em limoeiro ‘Cravo’. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 10., 2002, Piracicaba. **Resumos...** São Paulo: USP, 2002. CD-ROM.
- SILVEIRA, J.A.G.; CROCOMO, O.J. Biochemical and physiological aspects of sugarcane (*Saccharum* sp. L.). Effects of NO<sub>3</sub> nitrogen concentration on the metabolism of sugar and nitrogen. **Energia Nuclear na Agricultura**, v.3, n.1, p.19-33,1981.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; MALAVOLTA, E. Produção e características químicas da madeira juvenil de progênies de *Eucalyptus grandis* em função das doses de potássio na solução nutritiva. **Scientia Florestalis**, v.63, p.115-135,2003.
- SINGH, Z.; DHILLON, B.S. Effect of foliar application of boron on vegetative and panicle growth, sex expression, fruit retention and physicochemical characters of fruits of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Dusehri. **Tropical Agriculture**, v.64, p.305-308,1987.
- SINHA, P.; DUBE, B.K.; CHATTERJEE, C. Phosphorus stress alters boron metabolism of mustard. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, n.3-4, p.315-326, 2003.
- SKOOG, F. Relationships between zinc and auxin in the growth of higher plants. **Am. J. Bot.** v.27, p.939-951,1940.
- SMITH, F.W., JACKSON, W.A. E BERG, P.J. VAN DEN. Internal phosphorus flows during development of phosphorus stress in *Stylosanthes hamata*. **Aust. J. Plant Physiol.** v.17, p.451-464, 1990.
- SNYDER, G.H.; JONES, D.B.; GASCHO, G.J. Silicon fertilization of rice an Everglades histosols. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.50, p.1259-1263,1986.
- SOARES, C.R.F.S., GRAZZIOTTI, P.H., SIQUEIRA, J.O. et al. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesq. agropec. bras.**, v.36, n.2, p.339-348,2001.
- STAUFLEER, M.D.; SULEWSKI, G. **Fósforo** – essencial para a vida. In: Fósforo na Agricultura Brasileira, 1. YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S (Eds.). Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.1-12.
- SAMONTE, S.O.P.B.; WILSON, L.T.; MEDLEY, J.C.; PINSON, S.R.M.; MCCLUNG, A.M.; LALES, J.S. Nitrogen utilization efficiency: relationships with grain yield, grain protein, and yield-related traits in rice. **Agron J**, v.98, p.168-176,2006.

- SOUZA, D.M.G.; CARVALHO, L.J.C.B. Nutrição mineral de plantas. In: GOEDERT, W.J.(Eds.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. Planaltina: EMBRAPA/Cerrados,1985.p.75-98.
- STEINECK, O.; HAEDER, H.E. **The effect of potassium on growth and yield components of plants**. In: CONGRESS INTERNATIONAL OF THE POTASH INSTITUTE, 11., Bern, International Potash Institute, 1978.p.165-187.
- STRYKER, R.B.; GILLIAM, J.W.; JACKSON, W.A. Nonuniform transport of phosphorus from single roots to the leaves of *Zea mays*. **Physiol. Plant**,v.30,p.231-239,1974.
- SUBBARAO, G.V.; ITO, O.; BERRY, W.L.; WHEELER, R.M. Sodium – A functional plant nutrient. **Critical reviews in plant science**, v.22,p.391-416,2003.
- SUGIYAMA, T., NAKYAMA, N., AKASAWA, T. Structure and function of chloroplast proteins. V. Homotropic effect of bicarbonate in RuBP carboxylase relation and the mechanism of activation by magnesium ions. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v.126, p.734-745, 1968.
- SUMNER, M.E.; FARIA, M.P.W. Phosphorus interaction with other nutrients and lime in field cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York,v.5,p.201-236,1986.
- SWANSON, G.A.; WHITNEY, J.B. Studies on the translocation of foliar applied P<sup>32</sup> and other radioisotopes in bean plants. **American Journal of Botany**, v. 40, p. 816-23, 1953.
- SWIADER, J.M.; CHYAN, Y. & FREIJI, F.G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **J. Plant Nut.**, 17:1687-1699, 1994.
- TACHIBANA, J.; OHTA, Y. Root surface area as a parameter in relation to water and nutrient uptake by cucumber plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.29, n.3, p.387-392, 1983.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 3ª Ed., 2004. 719p.
- TAKAHASHI, Y.M.E. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil Sci. Plant Nutr.**,v.31,p.625-636,1985.
- TANG, S.; WILKE, B.M.; HUANG, C. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining soils along Yangtze River, the People's Republic of China. **Plant and Soil**, v.209,p.225-232,1999.
- TESTER, M.; BLATT, M.R. Direct measurement of K<sup>+</sup> channels in thylakoid membranes by incorporation of vesicles into planar lipid bilayers. **Plant Physiol**.v. 91,p.249-254, 1989.
- TIBBITTS, T.W.; PALZKILL, D.A. Requirement for root-pressure flow to provide adequate calcium to low-transpiring tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 10, n. 1-2, p. 251-257, 1979.
- TREBST, A.V.; LOSADA, M.; ARNON, D.I. Photosynthesis by isolated chloroplasts: XII. Inhibitors of CO<sub>2</sub> assimilation in a reconstituted chloroplast system. **Journal of Biological Chemistry**, v.235, n.3, p.840-844, 1960.
- TREWAVAS, A.J., GILROY, S. Signal transduction in plant cells. **Trends in Genetics**, v.7, p.356-361, 1991.

- USHERWOOD, N.R. Interação do potássio com outros íons. In: YAMADA, T. (ed.). In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Londrina, 1982. **Anais**. Piracicaba, Instituto da Potassa, 1982.p.227-247.
- VALARINI, M.J.; GODOY, R. Contribuição da fixação simbiótica de nitrogênio na produção do guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp). **Sci. agric**, v.51, n.3, p.500-504,1994.
- VIEGAS, R.A.; SILVEIRA, J.A.G. Ativação de redutase de nitrato de folhas de cajueiro por NO<sub>2</sub><sup>-</sup> exógeno. **Braz. J. Plant Physiol.**, v.14, n.1, p.39-44,2002.
- XU, Z.; YU, Z.W.; WANG, D.; ZHANG, Y.L. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 191, p.439-449,2005.
- WARINGTON, K. The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. **Annals of Botany**, London, v.37, p.629-672,1923.
- WATERER, J.G.; VESSEY, J.K. Effect of low static nitrate concentrations on mineral nitrogen uptake, nodulation, and nitrogenase fixation in field pea. **Journal of Plant Nutrition**, v.16, p.1775-1789, 1993.
- WELCH, R.M. Importance of seed mineral nutrient reserves in crop growth and development. In: Rengel Z (ed). **Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications**. Food Products Press, New York, 1999, p.205-226.
- WIESE, M.V. **Wheat and other small grains**. In: BENNETT, W.F.ed. Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. Saint Paul, APS Press/The American Phytopathological Society,1993.p.27-33.
- WRIGHT, P.R. Premature senescence of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) – Predominantly a potassium disorder caused by an imbalance of source and sink. **Plant and Soil**, v.211, p.231-239,1999.
- YAMAZAKI, M.; WATANABE, A.; SGIYAMA, T. Nitrogen-regulated accumulation of mRNA and protein for photosynthetic carbon assimilating enzymes in maize. **Plant and Cell Physiology**, v.27, p.443-452, 1986.
- YRUELA, I. Cobre em plantas. **Braz. J. Plant Physiol.**, v.17, n.1, p.145-156,2005.
- ZAKIR HOSSAIN, A.K.M.; KOYAMA, H.; HARA, T. Growth and cell wall properties of two wheat cultivars differing in their sensitivity to aluminum stress. **Journal of Plant Physiology**, v.163, n.1, p.39-47,2006.
- ZIEGLER, H. **The evolution of stomata**. In: ZEIGER, E.; FARQUHAR, G.D.; COWAN, I. (Eds.). Stomatal function. Stanford: Stanford University Press, 1987.