

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, indicava 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 CO₂ 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, o Químico Just Von **Liebig** (1803-1873) “pai da nutrição mineral de plantas” estabelecia na Alemanha, que os alimentos de todas as plantas verdes são as substâncias inorgânicas ou minerais. Este trabalho foi apresentado no evento da Associação Britânica para o Progresso da Ciência, e resultou em 1840, publicação do livro “*Química orgânica e suas aplicações na agricultura e fisiologia*”. Liebig com seu vigor dominante, conseguiu convencer a comunidade científica da época com sua teoria, embora seja uma compilação de trabalhos de outros autores (Saussure, Sprengel etc) (Browne et al., 1942).

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. Assim, durante todo final do século XIX, a lista clássica dos nutrientes de plantas eram basicamente o N, P, S, K, Ca, Mg e Fe. Definindo-se, assim, a exigência das plantas essencialmente dos macronutrientes. E ainda, nesta época, 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.**

Assim, percebe-se que a nutrição de plantas, apresentam os aspectos ligados desde a aquisição do nutriente pelas raízes, ligados a Ciência do Solo, como as funções que desempenham nas plantas, relacionado aos aspectos estudados na Bioquímica e na Fisiologia Vegetal. E assim, de forma mais ampla têm-se uma relação estreita entre a nutrição de plantas e a agronomia. Pois é conhecido que 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 arranjados 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, biologia molecular, melhoramento vegetal, fitotecnia, etc.). No solo, estão as áreas de fertilidade do solo, fertilizantes/corretivos, adubação entre outras 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 a agronomia especificamente com as disciplinas de fertilidade do solo, fertilizantes/corretivos e a adubação das culturas. Adubação = $(QP - QS) \div$ 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 a mecanização, entre outras.

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 e 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) O elemento não pode ser substituído por nenhum outro.

b) 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.

Recentemente, Epstein & Bloom (2006), propuseram uma adequação aos critérios de essencialidade ou seja um elemento é essencial se preencher um ou ambos de dois critérios:

a) O elemento é parte de uma molécula que é um componente intrínseco da estrutura ou do metabolismo da planta;

b) A planta pode ser tão severamente privada do elemento que exhibe anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução – isto é, sua “performance” – em comparação com plantas menos privadas.

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 sucinta, tais funções podem ser classificadas como (Malavolta et al., 1997):

- 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 ativa como, também, inibe sistemas enzimáticos, afetando a velocidade de muitas reações no metabolismo do vegetal.

Epstein & Bloom (2006) propuseram uma outra classificação dos nutrientes, mais detalhada, organizados pelas suas funções que desempenham nas plantas

- Nutrientes que são elementos integrais de compostos orgânicos. Ex. N, S.
- Nutriente para a aquisição e utilização de energia e para o genoma. Ex. P.;
- Nutrientes estruturalmente associado com a parede celular. Ex. Ca, B (Si);
- Nutrientes que são constituídos integrais de enzimas e outras entidades essenciais do metabolismo. Ex. Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, (Ni).
- Nutrientes que servem para ativar ou controlar a atividade de enzimas. Ex. K, Cl, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn, Cu (Na);

- Funções não específicas: nutrientes que servem como contra-íons, para cargas positivas ou negativas. Ex. K, NO_3^- , Cl, SO_4^{2-} , Ca, Mg, (Na).
- Funções não específicas: nutrientes que servem como agente osmótico celular. Ex. K, NO_3^- , Cl, (Na).

Nos próximos capítulos serão discutidas o papel de cada nutriente, após terem atingidos seus destinos, ou seja, os locais onde as várias funções são exercidas, na unidade funcional básica da planta, a célula (as paredes celulares, o citoplasma e o vacúolo).

Quando um dado nutriente desempenha tais funções na planta, são afetados diversos processos fisiológicos importantes (fotossíntese, respiração etc) que têm influencia 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. Ocorre a síntese de compostos orgânicos a partir da luz (visível 400 a 740 nm), feito por pigmentos fotossintéticos (clorofilas, carotenóides e ficobilinas) presente nas plantas. Entretanto, uma pequena fração da radiação solar (~5%) que atinge a terra é convertida pela fotossíntese foliar em compostos orgânicos.

Em síntese, 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), (conversão da energia luminosa em energia elétrica), que por sua vez gera a energia química tendo como produtos primários ATP e o NADPH. 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 ($\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_n$), como a glicose. A energia livre para a redução de um mol de CO_2 até o nível de glicose é de 478 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 CO_2 , O_2 e H_2O 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 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. Assim, os produtos formados na fotossíntese, fontes de carbono, são acumulados como a sacarose nos vacúolos e o amido nos cloroplastos, para depois serem utilizados na própria fotossíntese, como na respiração, síntese de reservas e de materiais estruturais.

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, 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).

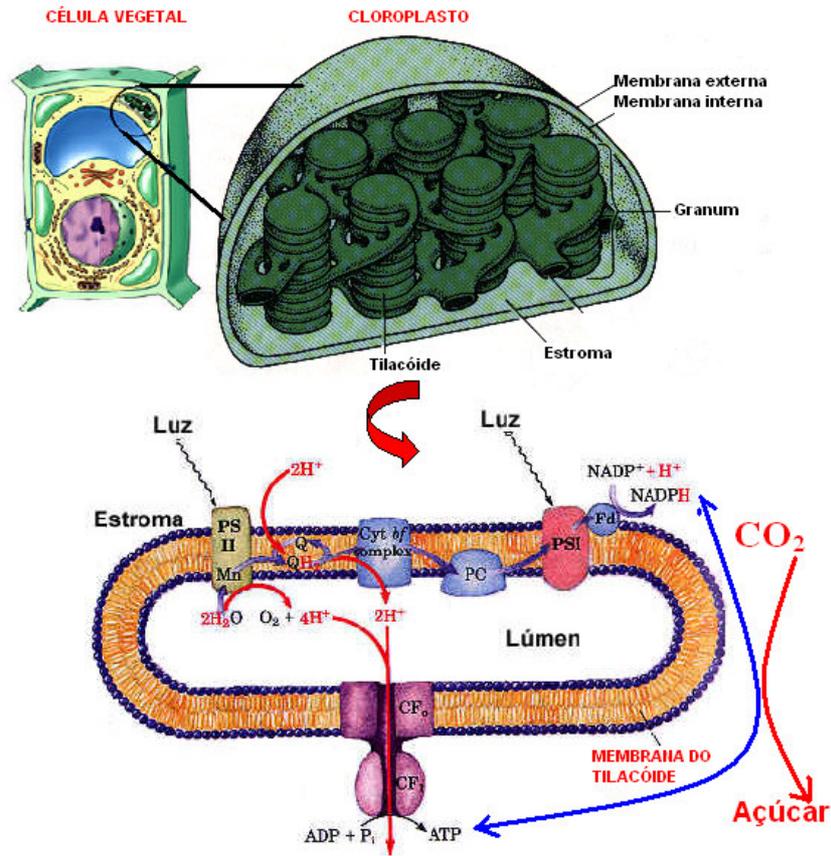


Figura 1. Esquema de uma célula vegetal, do cloroplasto e alguns detalhes do processo fotossintético.

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 ¹	1939
Mo	95,95	Hzelm	1782	Arnon & Stout	1939
Cl	35,46	Schell	1774	Broyer et al.	1954

¹ Definiram a essencialidade do B para plantas não leguminosas.

É pertinente salientar que na literatura existem divergências sobre o autor que demonstrou a essencialidade de um dado nutriente, muito das vezes devido aos problemas no rigor científico da pesquisa. Um exemplo deste fato, é o boro, que é indicado como autor da sua essencialidade ao Warington (1923).

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 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 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. Embora existem estudos isolados onde alguns autores indicam certos elementos como essenciais às plantas como Si em tomateiro (Miyake & Takahashi, 1978), Ni em soja (Eskewet et

al.,1984; Brown et al., 1987; Epstein & Bloom, 2006), Na em *Atriplex vesicoria* (Browmell & Wood, 1957), Co em alface (Delwiche et al.,1961). 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 e o Na (Malavolta et al.,1997).

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 (H₂O). 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.

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

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

¹ Nem sempre a forma elementar dos nutrientes é a forma química que as plantas absorvem.

Ressalta-se que o C provém do ar atmosférico na forma de gás carbono, CO₂; o H e O vêm da água, H₂O; 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).

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.

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

Nutriente	Cana-de-açúcar (100 t ha ⁻¹)			Soja (5,6 t ha ⁻¹)			Trigo (3,0 t ha ⁻¹)		
	Colmos	Folhas	Total	Grãos	Restos culturais	Total	Grãos	Restos culturais	Total
	kg ha⁻¹								
N	90	60	150	152	29	181	75	50	125
P	10	0	20	11	2	13	15	7	22
K	65	90	155	43	34	77	12	80	92
Ca	60	40	100	8	43	51	3	13	16
Mg	35	17	52	6	20	26	9	5	14
S	25	20	45	4	2	6	5	9	14
	g ha⁻¹								
B	200	100	300	58	131	189	100	200	300
Cu	180	90	270	34	30	64	17	14	31
Fe	2500	1400	8900	275	840	1115	190	500	690
Mn	1200	4500	5700	102	210	312	140	320	460
Mo	-	-	-	11	2	13	-	-	-
Zn	500	220	720	102	43	145	120	80	200

A ordem padrão, decrescente de extração das culturas em geral, é a seguinte:

Macronutrientes: $N > K > Ca > Mg > P \leftrightarrow S$

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

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 3^o 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 N, S, P, Zn entre outros são mobilizados nos grãos. Deste modo, os nutrientes são estocados nas sementes na forma de compostos orgânicos específicos, a exemplo do N e S, se acumulam em proteínas específicas de armazenamento (Müntz, 1998), o P e vários cátions estão na forma de fitatos (Raboy, 2001). E cada molécula de fitato contém seis grupos de fosfatos que formam complexos com cátions e, então, a maioria do K, Mg, Mn, Ca, Fe e Zn em sementes é associado ao fitato (Epstein & Bloom, 2006). Consequentemente, para os seres vivos (humanos e animais), sementes são mais nutritivos que o resto da planta. Assim, teores de nutrientes mais elevados nas sementes, terá benefícios na qualidade do alimento. E ainda, em campos de produção de sementes, essa qualidade terá reflexos no crescimento inicial de nova cultura. Muitas plantas podem viver do P contido na semente por cerca de duas semanas (Grant et al., 2001).

Por outro lado, 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).

Tabela 4. Exigência nutricional e consumo aparente de fertilizantes (N+P₂O₅+K₂O) de algumas culturas

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

Obs. ¹ Px2,29136 = P₂O₅; Kx1,20458 = K₂O; ² ANDA (1999); ³ Na soja, estima-se que 60% da exigência em N provêm da fixação biológica, e o restante do solo (54 kg ha⁻¹ de N); ⁴ 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.

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).

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).

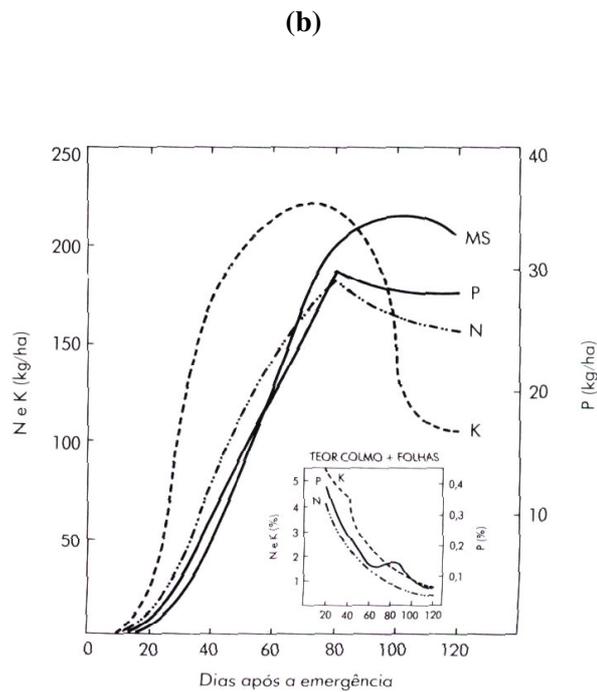
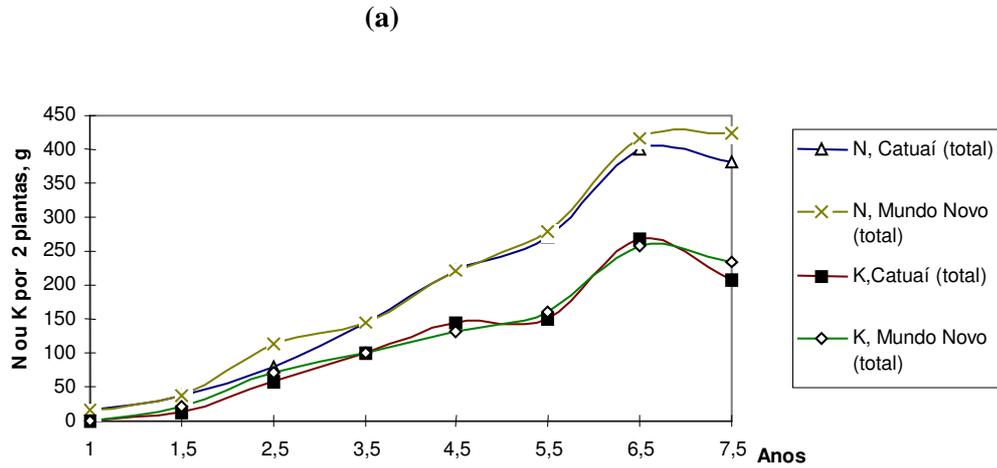


Figura 2. Marcha de absorção do N e do K pelo cafeeiro (Corrêa et al.,1986) e de N, P e K pela cultura do milho (Bull & Cantarella, 1993).

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.

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.

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.

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

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”. Nas últimas décadas, especialmente nos anos 90, a produção agrícola tem aumentado, entretanto, a aplicação de fertilizantes diminuiu, isto poderia ser explicado pela maior eficiência de uso de nutrientes pelas culturas (Epstein & Bloom, 2006).

Deste modo, 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 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 kg ha^{-1}) (Figura 3).

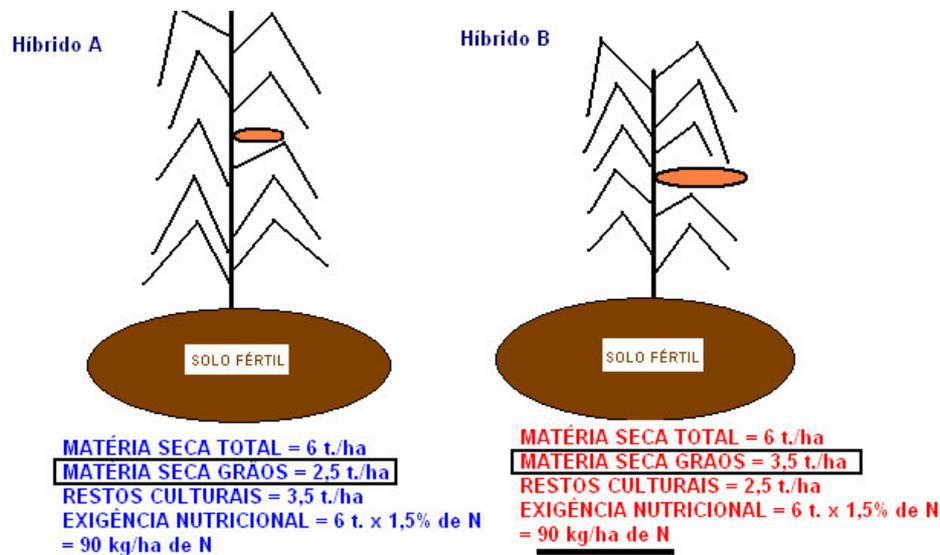


Figura 3. Esquema ilustrativo do acúmulo de matéria seca em diversos órgãos em dois híbridos de trigo e a exigência ao nitrogênio.

Estes resultados ilustram a tendência atual da agricultura, ou seja, é mais interessante o melhorista vegetal selecionar plantas com maior habilidade em produzir grãos (produto comercial), ao invés de apenas biomassa total, portanto, com maior índice de colheita. E ainda, os cultivares modernos desenvolvem sistemas radiculares menos profundo (Rublo et al., 2003), com taxas de recuperação maior dos fertilizantes aplicados ou provindo da mineralização da matéria orgânica. O termo de índice de colheita, é a razão entre a matéria seca colhida (grãos) e a matéria seca total da planta. Nota-se, portanto, que a partição dos fotoassimilados pelas plantas, torna-se também um fator de produção importante à agricultura moderna.

Neste contexto, 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/transporte 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. Samonte et al. (2006), observaram correlação entre o índice de translocação de N e o teor de proteína em grãos de arroz.

(c) eficiência de utilização (coeficiente de utilização biológica) = (matéria seca total produzida)²/(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.

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.

É pertinente salientar, que tais eficiências terá maior correlação com a produtividade agrícola, se os cultivares possuírem maior habilidade na partição de assimilados para os órgãos de interesse (exemplo dos grãos).

Assim, com a experimentação de campo, surgiram outros índices nutricionais semelhantes aos anteriores, entretanto, com a preocupação em indicar eficiências nutricionais que leve em conta a matéria seca da parte comercial (exemplo os grãos).

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). Nesta mesma cultura, Samonte et al. (2006), estudando aplicação de N, observaram que o rendimento de grãos esteve correlacionado com a eficiência de utilização do N e o conteúdo de N. Os autores acrescentam ainda, que é interessante seleção de plantas que não só tenha alto rendimento, mas também utiliza o nutriente eficientemente e com qualidade (grãos com alto teor de proteína). Svecnjak & Rengel (2006), observaram diferenças na eficiência de utilização de N, em cultivares de canola, embora tivessem absorção do nutriente semelhante, pois determinadas cultivares ditas eficientes produziram mais matéria seca com teor menor de N em diferentes órgãos das plantas, exceto a raiz.

Assim, serão apresentadas as formas de cálculo das eficiências nutricionais (agrônômica, 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 o vegetal. Como exemplo, tem-se: Al, Cd, Pb, Hg etc.

O alumínio tem sido muito estudado tendo em vista que os solos tropicais têm reação ácida com alta concentração do Al^{+3} tóxico. A toxicidade por Al é o principal fator limitante à produção de alimentos e biomassa no mundo (Vitorello et al., 2005). A presença deste elemento pode afetar desde a germinação (Marin et al., 2004), até 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) e também maior vazamento das membranas, entretanto, isso pode ser a consequência a exposição do elemento e não a causa dos prejuízos no crescimento das raízes (Yamamoto et al., 2002).

Assim, uma linha de pesquisa da nutrição de plantas, busca selecionar genótipos tolerantes e 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. Menosso et al. (2001) observaram cultivares de soja consideradas tolerantes ao Al podem ser diferenciadas das sensíveis pelo maior acúmulo de ácido orgânico

(citrício). E Mendonça et al. (2005), observaram em arroz que a cultivar tolerante ao Al, foi capaz de ajustar mais eficientemente seu balanço de prótons, de modo a absorver menos Al, e a tolerar mais a presença desse cátion na solução nutritiva. Entretanto, Braccini et al. (2000) verificaram que alteração no pH da rizosfera não está relacionada à tolerância ao alumínio nos genótipos de café cultivado em solo.

Além do Al, outros elementos tóxicos são muito estudados, buscando conhecer os mecanismos que as plantas tolerantes desempenham para minimizar o efeito maléfico. Como já dito, as plantas tendem a acumular o metal nos vacúolos e também formam quelatos com estes metais a partir da cisteína de dois tipos, fitoquelatinas ou metalotioneínas.

Um dos elementos benéficos, ultimamente, mais estudados, no Brasil, é o silício. As plantas, normalmente, absorve o silício na forma de ácido (H_4SiO_4) com gasto de energia (ativo) (Rains et al., 2006) e que em seguida interage com a pectina e deposita-se na parede celular, ficando praticamente imóvel na planta. Na literatura, existem indicação da divisão das plantas, 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 SiO_2 , sendo algumas gramíneas e cereais; **plantas não acumuladoras**: contém menos de 0,5% de 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 ou segundo Epstein (2002) utiliza-se o termo *quase-essencial*.

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).

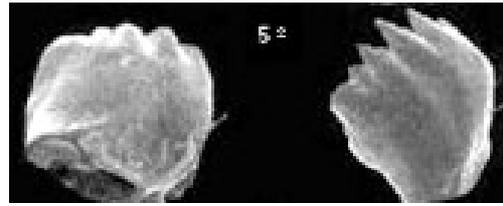
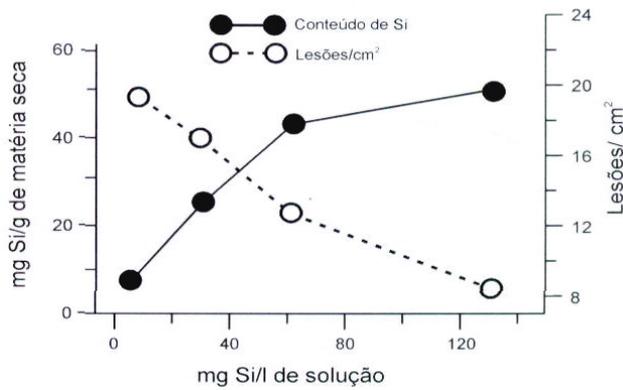


Figura 4. Efeito do Si na incidência de lesões foliares causado pela bruçona na cultura do arroz (Marschner, 1986) (a) e mandíbulas de largatas (*S. frugiperda*) alimentadas com folhas de milho com aplicação de Si (esquerda) e sem aplicação de Si (direita) (b).

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.

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⁻¹ de Si, indicando alta exigência da planta com relação a este elemento.

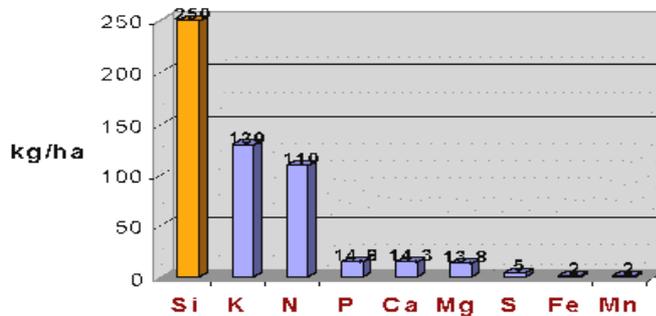


Figura 5. Acúmulo de nutrientes e de silício pela cultura do arroz (Körndorfer et al., 2002).

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

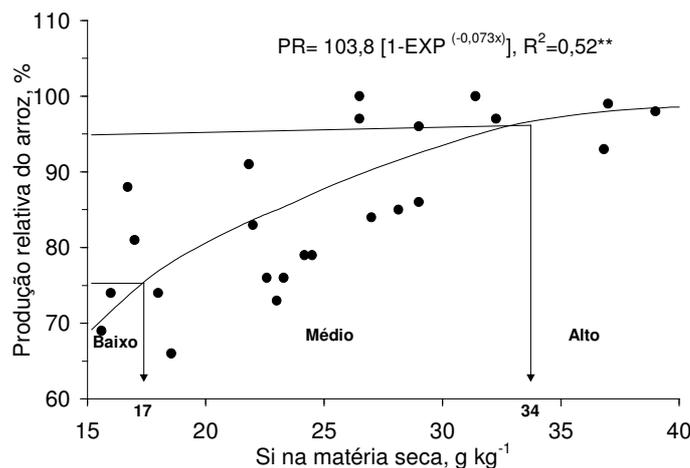


Figura 6. Relação do Si na planta com a produção relativa de arroz (Körndörfer et al., 2001).

Salienta-se que a resposta das plantas ao silício são mais significativas 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*), tolerante a salinidade, tenha se apresentado como um nutriente, segundo Brownell & Wood (1957). E em outras como efeito benéfico como aspargo, cevada, brócoli, cenoura, algodão, tomate, trigo, ervilha, aveia e alface (Subrao 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, apenas 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, é indicado que Na pode afetar a fotossíntese, especialmente em plantas C4, embora esse papel não está totalmente esclarecido. O Na participaria no aumento da concentração de CO₂ e da integridade dos cloroplastos nas células do mesófilo da bainha (Brownell & Bielig, 1996) e também na regeneração do PEP no cloroplasto e na síntese de clorofila. Entretanto, em altas concentrações o Na pode prejudicar a ação enzimática do K, desalojando-o dos sítios de ação das enzimas.

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.

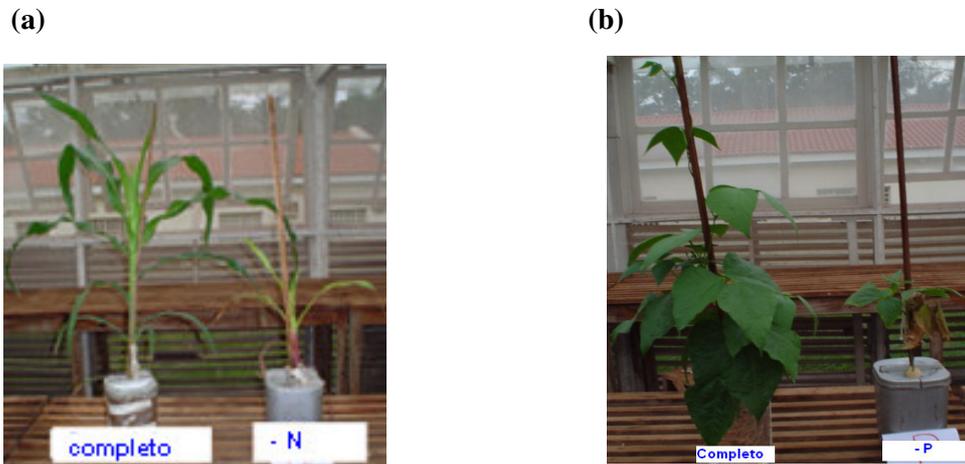


Figura 7. Plantas cultivadas em solução nutritiva com todos os nutrientes (completo) com crescimento normal e o completo menos o nitrogênio (-N) (milho) (a) e o fósforo (-P) (feijão) (b), demonstrando os sintomas visuais de deficiência.

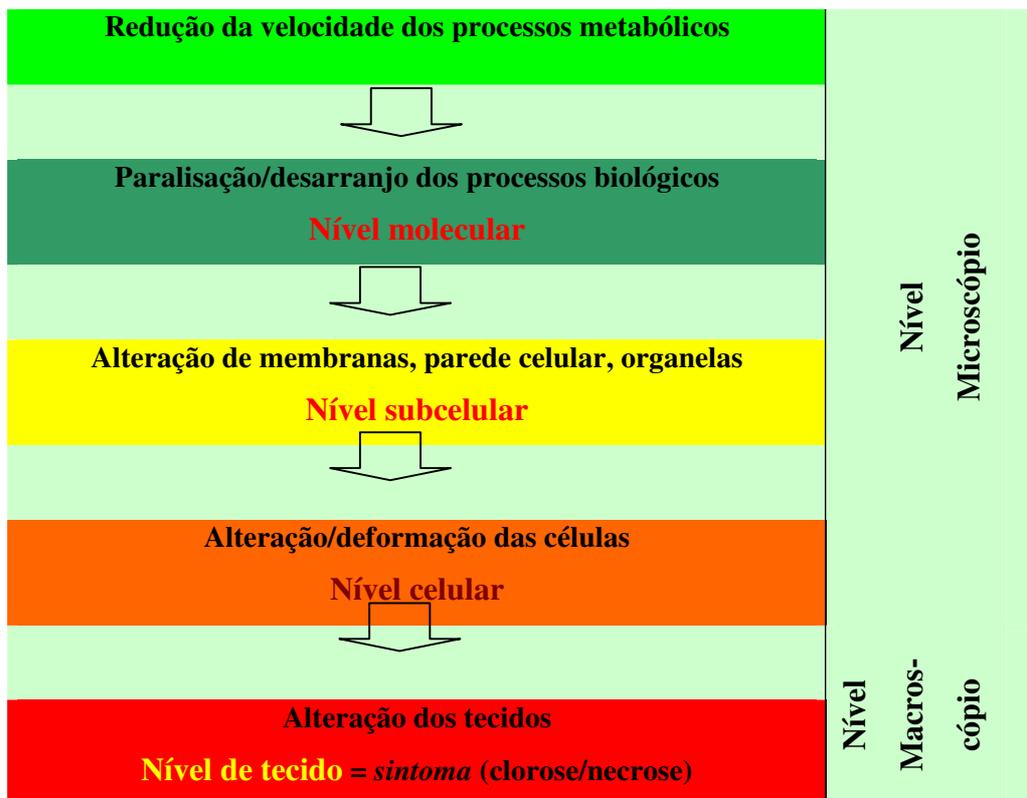


Figura 8. Seqüência de eventos biológicos em plantas deficientes de nutriente.

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 (geralmente com omissão total ou com 10% dos níveis adequados), 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, pêssago), 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 em NFT (Técnica do Filme de Nutrientes);
- cultura em areia: as plantas são sustentadas por um substrato sólido, partículas de diâmetro 0,6 e 3,0 mm;
- cultura em cascalho: o substrato é sólido, 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 lâ-de-rocha: utiliza como substrato a lâ-de-rocha, lâ-de-vidro ou outro material semelhante (alta porosidade e absorção de água, nutrientes e ar próximo às raízes). A lâ-de-rocha tem inconveniente com relação aspecto ambiental, na época do descarte, visto que sua decomposição é muito lenta.

Salienta-se que em estudos de nutrição de plantas, o cultivo em solução nutritiva, sem uso de componentes sólidos é a técnica mais utilizada pelos pesquisadores da área.

Em tese, é difícil considerar que uma solução nutritiva seja ideal para todas as culturas, que apresente formulação 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 em NFT, no inverno e na primavera (Santos, 2000).

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

¹ 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 maior produtividade, seguida da 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. Embora este trabalho tenha indicado diferenças entre as soluções, entretanto, este fato pode não ocorrer freqüentemente, pois as soluções citadas e mais cerca de uma centena de soluções indicadas da literatura, foram derivadas da solução de Hoagland & Arnon (1950) modificada ($N-NO_3^- + NH_4^+$), considerada uma das que apresentam maior concentração de sais (Tabela 8) e todas fornecem os elementos essenciais as plantas.

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 $Na_2SiO_3 \cdot 9 H_2O$, devendo ser adicionado primeiro, mantendo neste momento pH da solução baixo (Epstein, 1995).

Tabela 8. Composição química de algumas soluções nutritivas: Castellane & Araújo (1995), Furlani (1995) e Hoagland & Arnon (1950)

Componentes	g/1000 L de solução		
	Castellane & Araújo (1995)	Furlani (1995)	Hoagland & Arnon (1950) ²
Nitrato de cálcio	950	1000	1200
Monoamônio fosfato (MAP)	-	150	150
Fosfato MB. de potássio (MKP)	272	-	
Cloreto de potássio	-	150	250

Nitrato de potássio	900	600	260
Sulfato de magnésio	246	250	500
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 ¹	1 (L)	0,5 (L)	

¹Em 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. ² Solução de micronutrientes (L/1000 L de solução) e de Fe-EDTA (L/1000 L de solução).

Além da escolha da solução adequada, é preciso considerar também, os fatores de manejo da solução nutritiva, visando a aumentar a eficiência produtiva de sistemas hidropônicos, tais como:

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. Salienta-se, que nas fontes p.a, adquirir de empresas idôneas e atentar para escolha de produtos livres de inertes que apresentem outros elementos em sua composição que podem comprometer os resultados e o rigor científico do trabalho.

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; HNO₃, H₂SO₄; H₃PO₄) 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 (NO₃⁻ ou NH₄⁺) da solução nutritiva. Para isso, tem sido adotado parte do N na forma NH₄⁺ 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 (~3-4) afetam a integridade das membranas (H⁺ afeta as células, a permeabilidade das membranas) podendo haver perda de nutrientes já absorvidos e também afeta a disponibilidade de cátions. E solução com pH 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 também diminui a absorção de ânions. 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 = 10³ mS = 10⁶ μS (mS = miliSiemens; μS = microSiemens).

Normalmente, a CE da solução nutritiva varia de 1,5 a 4,0 mS/cm, em função da solução escolhida para a respectiva cultura. A CE obtida em uma solução nutritiva é a soma da CE de todos os fertilizantes utilizados na formulação desta solução. 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 utilizando 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 O₂ adequado às raízes (~3 ppm de O₂). O nível adequado de oxigenação pode variar em função da cultura, tendo plantas com baixa exigência (arroz=3 mg L⁻¹ de O₂) e outras com alta exigência (tomateiro = 16 mg L⁻¹ de O₂) ao oxigênio na solução nutritiva. Como o aumento da temperatura da solução nutritiva causa diminuição do teor de O₂ 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). O movimento dos nutrientes no solo, é maior em condições hídricas adequadas (água retida com tensões entre a capacidade de campo, -0,03Mpa e o coeficiente de murcha, -1,5Mpa).

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 caminhamento 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.

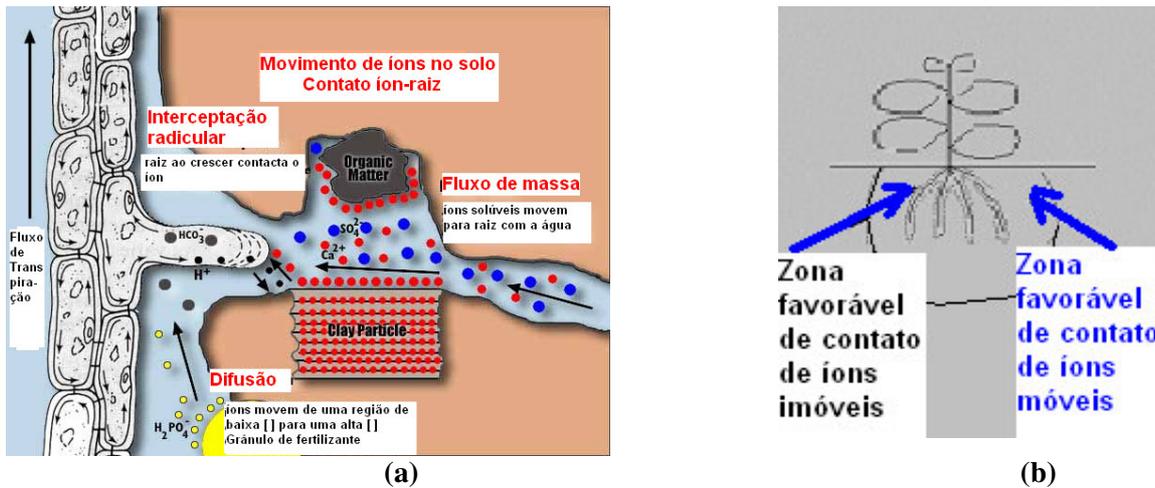


Figura 9. Os elementos entram em contato com a raiz por interceptação radicular, fluxo de massa e difusão (a) e zona favorável da rizosfera para o contato de íons imóveis e móveis (b).

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.

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 ⁻¹)	Quantidade disponível	Extrato de saturação	Quantidade fornecida (kg ha ⁻¹)
-----------	---------------------------------	-----------------------	----------------------	---

		(0-20 cm) (kg ha ⁻¹)	ppm	Intercepção	Fluxo de massa	Difusão
NO ₃ ⁻	170	-	-	2	168	0
H ₂ PO ₄ ⁻	39	45	0,5	0,9	1,8	36,3
K ⁺	135	190	10	3,8	35	92,2
Ca ²⁺	23	3.300	50	66	175	0
Mg ²⁺	28	800	30	16	105	0
SO ₄ ²⁻	20	-	-	1	19	0
H ₃ BO ₃	0,07	1	0,20	0,02	0,70	0
Cu ²⁺	0,16	0,6	0,10	0,01	0,35	0
Fe ²⁺	0,80	6	0,15	0,1	0,53	0,17
Mn ²⁺	0,23	6	0,015	0,1	0,05	0,08
MoO ₄ ⁻²	0,01	-	-	0,001	0,02	0
Zn ²⁺	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
	Intercepção	Fluxo de massa	Difusão	
% do total				
N	1	99	0	Área total/cobertura
P	2	5	93	Localizado/semeadura
K	3	27	70	Localizado/semeadura
Ca	27	73	0	Área total/pré-semeadura
Mg	13	87	0	Área total/ pré-semeadura
S	5	95	0	Área total/cobertura
B	3	97	0	Área total/cobertura
Cu	3	97	0	Área total/semeadura
Fe	13	66	21	Área total/semeadura
Mn	43	22	35	Localizado/semeadura
Mo	5	95	0	Área total/semeadura
Zn	20	20	60	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.

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 consequência para o local da adubação.

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).

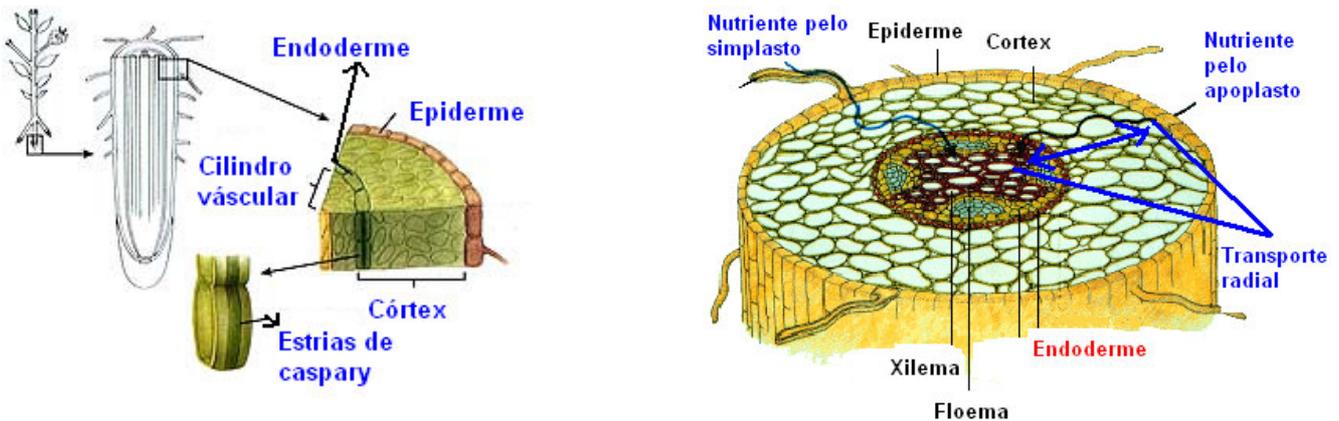


Figura 10. Aspectos da anatomia da raiz a partir de um corte transversal, ilustrando o movimento do nutriente pelo simplasto (através das membranas das células) e apoplasto (espaço entre as células vegetais, constituído pela parede celular).

Observam-se os seguintes tipos de células: a) epiderme – camada geralmente única de células compactas com pelos absorventes; b) parênquima cortical (córtex) – 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), inicia-se o processo da 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 e depois córtex, endoderme até o xilema. Para isso, os nutrientes caminham célula à célula, pela via apoplástica, pelo ELA ou pela via simplástica, pelo interior das células, sem cruzar a membrana plasmática (Figura 10). Isso ocorre porque a membrana plasmática das duas células adjacentes são contínuas, graças aos poros plasmodesmatal (prolongamento do citoplasma entre células). Desde a entrada do nutriente na primeira camada de células da raiz (epiderme) ou em outros tecidos, ou seja, a absorção propriamente dito ocorre em duas fases distintas: passiva e ativa.

a) Fase passiva

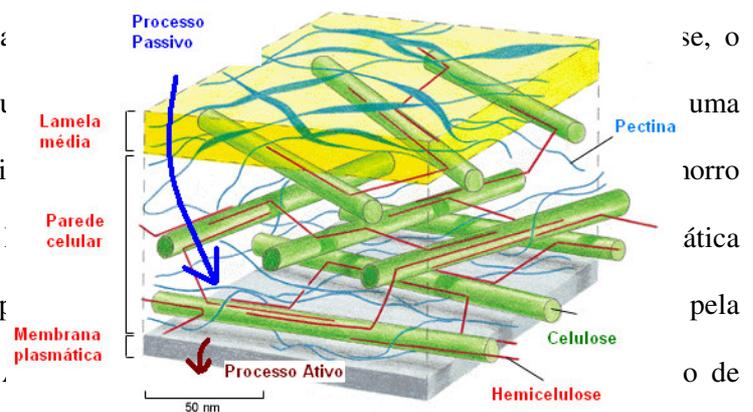
A fase passiva corresponde à entrada do nutriente nos espaços intercelulares, pela parede celular ou até parte externa da plasmalema (que é a membrana que envolve o citoplasma) (Figura 11). Nesta fase, o nutriente caminha a favor de um gradiente de concentração, ou seja, de uma região de maior concentração 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. Na parede celular os cátions tri e divalentes são atraídos mais fortemente que os monovalentes, seguindo a série liotrópica ($Al^{+3}=H^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+}=NH_4^{+}>Na^{+}$). 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 e podem ser trocados por H^{+} ou outros íons e conseqüentemente, favorecerá sua absorção para o interior das células das raízes. Assim, a CTC da raiz pode ter reflexos na sensibilidade de genótipos à deficiência nutricional (micronutrientes catiônicos).

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. A maioria destes processos são semelhantes aos que ocorrem no solo. Esse mecanismo de absorção é rápido e reversível, ou seja, o nutriente já contido no ELA ou na parede celular, pode sair com certa facilidade. Assim, alguns autores não considera, absorvido um nutriente no ELA.

b) Fase ativa

Quando o nutriente atinge a membrana plasmática, tem-se uma barreira, pois os lipídeos das membranas impede a passagem de íons em solução aquosa. Neste contexto, inicia-se a fase ativa da absorção que corresponde portanto, à passagem dos nutrientes pela membrana plasmática (plasmalema) (Figura 11), atingindo o citoplasma e depois a membrana do vacúolo. O caminho do íon (nutriente) se dá contra um gradiente de concentração para uma de maior concentração "que exige gasto de energia metabólica". Este processo ocorre pela membrana plasmática (plasmalema) e do vacúolo (tonoplasto). Este processo foi descrito pela primeira vez por Epstein & Hagen (1952). Os mecanismos 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.



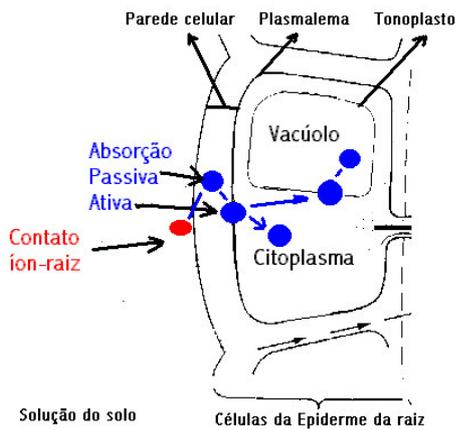
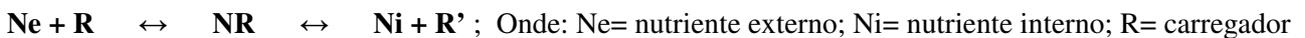


Figura 11. Esquema do contato íon-raiz e a absorção passiva pela parede celular e a ativa de um nutriente (M^+) pelas membranas (a) e um detalhe da parede celular e membrana plasmática (b).

Atualmente, a mais aceita a teoria do carregador, que se postula, que ocorre o “carregamento” do nutriente por um Carregador específico (uma proteína com características de uma enzima) para atravessar a membrana, e no lado interno ocorreria ruptura da ligação que une o complexo (NR) e o nutriente (ou íon) seria liberado. A equação abaixo esquematiza esta teoria:



Estes transportadores podem ser caracterizados como bombas e até mesmo canais. 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⁺ 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⁻ reage com H₂O formando OH⁻ no citoplasma, de forma que o carregador troca OH⁻ 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 ou ATPase, presente nas membranas desencadeia a absorção ativa dos nutrientes (Figura 12). Os carregadores transportam os nutrientes pelas membranas, aproveitando o gradiente de potencial eletroquímico gerado pela atividade da ATP ase ou seja com bombeamento prrtóns para fora do citoplasma gera um gradiente eletroquímico que pode ser ligado a

saída de outros cátions (exemplo co-transporte H^+/Na^+) ou entrada de ânions (exemplo, o co-transporte H^+/NO_3^-). As proteínas integrais responsável por este movimento tem comportamento dos transportadores.

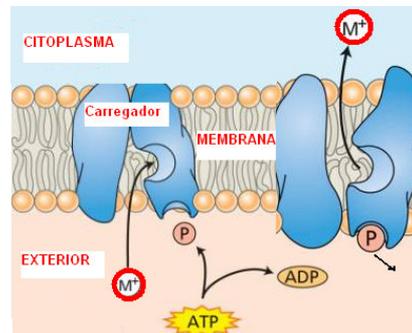


Figura 12. Esquema com detalhe da membrana plasmática, ilustrando o processo ativo de absorção de um nutriente (M^+), por meio do carregador dependente do ATP.

Salienta-se que existem genes múltiplos que codificam as ATPases do plasmalema e do tonoplasto. Outro tipo de transportadores são os canais, muito estudados na absorção do K, pois foram os primeiros a ser caracterizados ao nível molecular. Os canais são proteínas integrais que faz com que o nutriente fui em resposta ao gradiente eletroquímico, a exemplo do K, a parte negativa da proteína atrai o K, e o converge para o canal, sem a presença da água e depois com a chega de outros cátion no canal gera série de repulsão bombeando neste final do canal atingindo meio externo. Salienta-se que, os canais apresentam baixa especificidade por solutos ou nutrientes.

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 elucidados. O conhecimento dos genes que codificam seus carregadores, canais ou bombas que permite a absorção dos nutrientes, pelos 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
5. Inibidores e temperatura não influem	5. Inibidores e temperatura influem
6. Não seletivos	6. Seletivos
7. Reversível	7. Não reversível

Conforme dito, 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 do nutriente, 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. Assim, é conhecido que o transporte de K pelas membranas é atribuído ao ativo pelo sistema de alta afinidade ou seja ocorre em concentrações externas muito baixas; e ao sistema de baixa afinidade é atribuída aos canais, sendo passivo, que ocorre quando há altas concentrações desse elemento.

É oportuno salientar, que o movimento dos íons nas células das raízes até a endoderme, à curta distância, ocorre predominantemente pela via simplasto, visto que a presença dos “canais livres” (ELA), via apoplasto, 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, à longa distância, devido à pressão da raiz (hipótese mais aceita) de forma passiva, tendo este mecanismo denominado transporte e será abordado em seguida.

Por fim, salienta-se que o processo final de absorção de nutrientes pelas plantas é constituído um processo vital para a vida na terra, pois neste momento o nutriente fará parte da biosfera, a partir do consumo desta planta por humanos ou animais (Epstein & Bloom, 2006).

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.

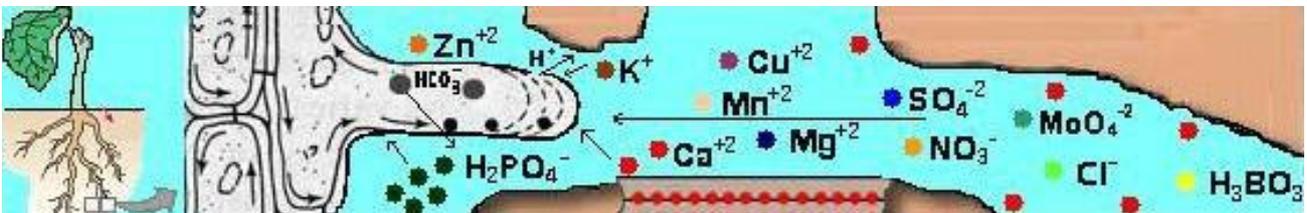


Figura 13. Formas químicas dos nutrientes na solução do solo passível de ser absorvido.

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). Nota-se que em concentrações baixas do nutriente a taxa de reação ou da ação do carregador, aumenta quase que linearmente, ao passo que em altas concentrações, a taxa de reações é menor, pois a maioria dos sítios dos carregadores devem estar ocupados.

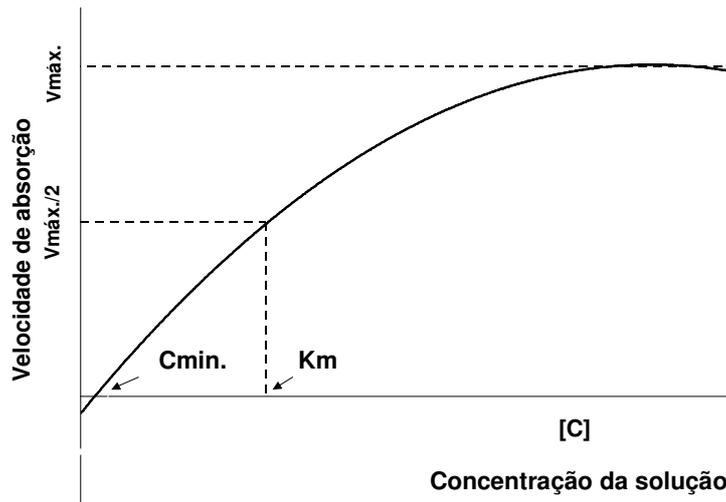


Figura 14. Relação da concentração iônica da solução e a velocidade de absorção, conforme a equação de Michaelis-Menten. (K_m : concentração do elemento que garante $1/2$ de $V_{máx.}$ = medida da afinidade do nutriente pelo carregador; $C_{min.}$ = concentração inicial mínima em que não há absorção).

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

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.

pH “efeito direto” – no processo de absorção, pode existir a competição entre o H^+ e os outros cátions e, do OH^- com os outros ânions, pelos mesmos sítios dos carregadores na membrana. Assim, pode-se afirmar que em solo com reação ácida [$\uparrow H^+$] ou alcalina [$\uparrow OH^-$] 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^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} 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^+ ou se for um ânion libera no meio OH^- , este artifício a planta utiliza para manter o equilíbrio cátion-ânion no meio (Figura 15).

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).

Salienta-se, ainda, o N por ser o nutriente mais absorvido, é o que contribui para o balanço dos nutrientes absorvidos e para a liberação de H^+ ou OH^- pelas raízes, além do K, Ca, Mg, P e Fe (Marschner, 1995).