



IPNI
INTERNATIONAL
PLANT NUTRITION
INSTITUTE

MISSÃO

Desenvolver e promover informações científicas sobre o manejo responsável dos nutrientes de plantas para o benefício da família humana

INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS

Nº 121 MARÇO/2008

O FUTURO DA NUTRIÇÃO DE PLANTAS TENDO EM VISTA ASPECTOS AGRONÔMICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS¹

Eurípedes Malavolta²

1. INTRODUÇÃO

Desde que surgiu sobre a Terra, criado por um Deus eterno, onipotente, onipresente e onisciente, o homem é uma planta ou planta transformada. Por sua vez, a planta também necessita de alimento para viver, retirando-o do ar, da água e do solo e, freqüentemente, no todo ou em parte, do fertilizante mineral e/ou do adubo orgânico – é necessário alimentar o solo, que alimenta a planta, que alimenta o homem e o animal. Segue-se daí que, sem “comer”, a planta não vive e, se não houver planta, o homem não vive. Dentro deste raciocínio simples cabe a ciência da Nutrição Mineral de Plantas (NMP). Para que seja aplicada na prática agrícola é indispensável a colaboração de duas outras ciências: Ciência do Solo – física, química, biologia, fertilidade – e Adubos e Adubação. Resumidamente, a NMP ensina o que a planta necessita, quanto e quando; a Ciência do Solo mostra o que o solo pode oferecer; Adubos e Adubação ensina como fazê-lo em termos econômicos e sustentáveis dos pontos de vista social e ambiental. A ação e interação positiva das três ciências, ou áreas do conhecimento, tem um papel maior na produção de alimento, fibra e energia renovável, componentes do agronegócio e da riqueza das nações.

2. OS PRIMEIROS 150 ANOS

O início da Nutrição Mineral de Plantas no século XIX foi marcado pela busca dos materiais que constituem os vegetais. Ela se prolongou no século XX e provavelmente continuará a fazê-lo no século XXI. A Tabela 1 mostra, até o momento, o resultado dessa busca (MALAVOLTA, 1999). Os 19 elementos tabulados são classificados como essenciais para as plantas superiores, porque satisfazem os cri-

Veja também neste número:

Princípios das melhores práticas de manejo de fertilizantes	11
Práticas de controle das emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de fertilizantes	13
Divulgando a Pesquisa	16
Painel Agrônomo	19
Cursos, Simpósios e outros eventos	21
Publicações Recentes	23
Ponto de Vista	24

térios estabelecidos por Arnon e Stout (1939): (1) critério direto – o elemento faz parte de um composto ou de uma reação crucial do metabolismo; (2) critério indireto – abrange as seguintes circunstâncias: (a) na ausência do elemento a planta morre antes de completar o seu ciclo, (b) o elemento não pode ser substituído por nenhum outro; (3) o efeito do elemento não deve estar associado com o melhoramento de condições físicas, químicas ou biológicas desfavoráveis do meio. O sódio (Na) e o silício (Si) são exemplos de elementos benéficos, sendo assim definidos – sem eles a planta vive; entretanto, em dadas condições, podem melhorar o crescimento e aumentar a produção. Uma discussão abrangente sobre essencialidade e toxidez de micronutrientes e metais pesados pode ser consultada em Malavolta et al. (2006).

Abreviações: ATP = trifosfato de adenosina; CEM = colheita econômica máxima; CFC = clorofluorcarbono; CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono; DNA = ácido desoxirribonucléico; GEE = gases de efeito estufa; NBPT = fenil fosforodiamidato; NH₃ = amônia; NMP = Nutrição Mineral de Plantas; N₂O = óxido nitroso.

¹ Este artigo não está completo. Para mais esclarecimentos vide nota do editor na página 10.

² Professor Catedrático, Centro de Energia Nuclear na Agricultura (USP), Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, Piracicaba, SP. *In memoriam*

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE - BRASIL

Rua Alfredo Guedes, 1949 - Edifício Rácz Center, sala 701 - Fone/Fax: (19) 3433-3254 - Website: www.ipni.net - E-mail: ipni@ipni.com.br
13416-901 Piracicaba-SP, Brasil

Tabela 1. Cronologia da descoberta dos macro e micronutrientes.

Macronutrientes metais K, Ca, Mg (Liebig, 1840; Knop, 1860; Sachs, 1865)
Macronutrientes não metais C, H, O (Senebier, 1742-1809) N, P, S (Liebig, 1840; Knop, 1860; Sachs, 1865)
Micronutrientes metais Fe (Knop, 1860; Sachs, 1865), Mn (Mazé, 1915), Zn (Sommer e Litman, 1926), Cu (Sommer, 1931), Mo (Arnon e Stout, 1939), Co (Delwiche et al., 1961), Ni (Eskew et al., 1984)
Micronutrientes não metais B (Warington, 1923), Cl (Broyer et al., 1954), Se (Wen et al., 1988)
Fonte: adaptada de MALAVOLTA (1980, 1999).

Estará encerrada a lista de elementos essenciais? Pode-se responder apenas – se houver outro ou outros, será ou serão obrigatoriamente micronutrientes. Para isso, serão necessários técnicas analíticas refinadas, meios de cultura purificados, ou não “contaminados”, semente ou outro órgão em que o elemento-alvo tenha uma concentração diminuída por gerações sucessivas. Micronutrientes essenciais para os animais são os primeiros candidatos a entrar na lista.

Em seguida, procurou-se esclarecer o processo de aquisição de elementos pela raiz e pela folha. Dependendo do elemento e do gradiente eletroquímico, a absorção pode necessitar de introdução de energia do trifosfato de adenosina (ATP) no sistema ou pode se dar passivamente através de canais protéicos transmembrana. A semelhança entre a absorção iônica, com a participação de um carregador, e a cinética enzimática foi demonstrada por Epstein e Leggett (1954). Geralmente com o auxílio de radioisótopos, foi mapeado o caminho percorrido da membrana até o citosol ou vacúolo e até os vasos do xilema e do floema no transporte a longa distância, chegando até gemas, folhas e frutos. Folhas e ramos podem funcionar como fonte de nutrientes para outros órgãos (drenos) quando ocorre redistribuição.

Como já foi indicado, os elementos são essenciais porque exercem funções na vida da planta. Muitas dessas funções, mas não todas, foram esclarecidas nos níveis molecular, celular, de tecido, órgão e na planta como um todo. A Tabela 2 contém um resumo das principais funções dos macro e micronutrientes. Tais funções são em geral estudadas isoladamente, um ou poucos elementos de cada vez, o que não dá uma idéia do conjunto – pode-se afirmar que todos os elementos participam, direta ou indiretamente, de todos os processos da vida da planta.

Macro e micronutrientes exercem as mesmas funções em todas as plantas superiores. Por esse motivo, sua falta ou excesso provoca a mesma manifestação visível – o sintoma. Inicialmente há uma lesão ou alteração no nível molecular, não se forma um composto, uma reação não se processa. Em seguida, há altera-

ções celulares, no tecido e aparece o sintoma visível. O que acontece com os elementos individualmente é detalhado em Römheld (2001) e Malavolta (2006).

Tem sido acumulado um grande volume de informações sobre as exigências de macro e micronutrientes: quantidades totais, exportação na colheita, absorção durante o ciclo e repartição nos diversos órgãos. No Brasil, dispõe-se de dados das principais culturas: arroz, milho, trigo, cana-de-açúcar; hortaliças folhosas e condimentares; hortaliças de bulbo, tubérculo, raiz e fruto; plantas forrageiras; eucalipto e *Pinus*; cacau, café, chá, fumo e mate; frutíferas tropicais (RAIJ et al., 1996; FERREIRA et al., 2001; MALAVOLTA, 2006).

Condições de “normalidade”, de deficiência ou de excesso são identificadas – além de sintomas-chave dos vários métodos de avaliação do estado nutricional. Estas, quando associadas à análise de solo, dão informações úteis para a prática da adubação. A diagnose foliar é o mais comum desses métodos, apresentando vários enfoques (MALAVOLTA et al., 1997), temas e variações.

A indústria de fertilizantes pode ser considerada o fruto da árvore da NMP, árvore essa cujas raízes estão no solo agrícola. Há algumas datas e alguns nomes que não podem ser esquecidos:

- 1842 – J. B. Lawes, na Inglaterra, patenteou o processo de fabricação de superfosfato – solubilização de ossos moídos com ácido sulfúrico; até hoje o processo é essencialmente o mesmo, usando, porém, rocha fosfática;
- 1860 – a Alemanha iniciou a exploração e a exportação de sais potássicos;
- 1910 – Haber e Bosch, na Alemanha, viabilizaram a produção industrial de amônia a partir do N_2 do ar e do hidrogênio, possivelmente a invenção mais importante depois da roda, pois a amônia é a chave-mestra que abre as portas para a fabricação de outros adubos (ver resumo em MALAVOLTA, 1981).

Desde então, o consumo de adubos não tem cessado de crescer, passo a passo, com o aumento da população. É o que se pode ver na Figura 1, de Zhang e Zhang (2007). No estudo em questão, foi encontrada correlação linear significativa entre população e consumo de fertilizantes. Foram feitas projeções do consumo para o período 2010 a 2030: 141.800.601 toneladas de N, 50.961.129 toneladas de P_2O_5 e 33.388.650 toneladas de K_2O . O consumo aumentaria em 54%-55% na Ásia e 40%-60% na África, 39,4% na América do Norte e Central, 30,9% na América do Sul e 64,7% na Oceania. Na Europa haveria uma diminuição de 2,4% em 2030.

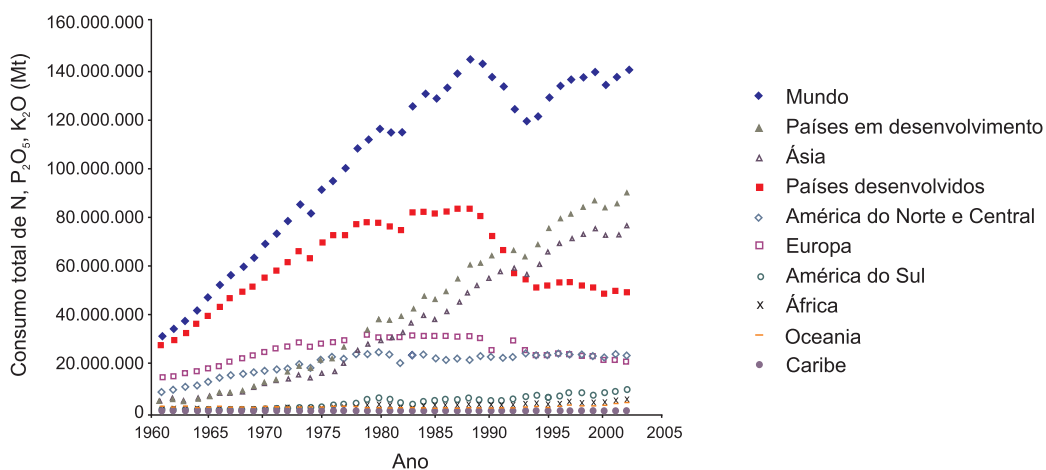


Figura 1. Consumo total de fertilizantes no mundo desde 1961. **Fonte:** ZHANG e ZHANG (2007).

Tabela 2. Principais funções dos elementos.

Elemento	Funções
MACRONUTRIENTES	
Carbono, hidrogênio, oxigênio	Estrutura dos compostos orgânicos.
Nitrogênio	Aminoácidos, proteínas, enzimas, DNA e RNA (purinas e pirimidinas), clorofila, coenzimas, colina, ácido indolilacético.
Fósforo	H ₂ PO ₄ – regulação da atividade de enzimas. Liberação de energia do ATP e do fosfato de nucleotídeo de adenina – respiração, fixação de CO ₂ , biossíntese, absorção iônica. Constituinte dos ácidos nucleicos. Fosfatos de uridina, citosina e guanidina – síntese de sacarose, fosfolipídeos e celulose. Fosfolipídeo de membrana celular.
Potássio	Economia de água. Abertura e fechamento dos estômatos – fotossíntese. Ativação de enzimas – transporte de carboidratos fonte-dreno.
Cálcio	Como pectato, na lamela média, funciona como “cimento” entre células adjacentes. Participa do crescimento da parte aérea e das pontas das raízes. Redução no efeito catabólico das citocininas na senescência. No vacúolo, presente como oxalato, fosfato, carbonato – regulação do nível desses ânions. Citoplasma: Ca-calmodulina como ativadora de enzimas (fosfodiesterase cíclica de nucleotídeo, ATPase de membrana e outras). Mensageiro secundário de estímulos mecânicos, ambientais, elétricos. Manutenção da estrutura funcional do plasmalema.
Magnésio	Ocupa o centro do núcleo tetrapirrólico da clorofila. Cofator das enzimas que transferem P entre ATP e ADP. Fixação do CO ₂ : ativação da carboxilase da ribulose fosfato e da carboxilase do fosfoenolpiruvato. Estabilização dos ribossomas para a síntese de proteínas.
Enxofre	Presente em todas as proteínas, enzimáticas ou não, e em coenzimas: CoA – respiração, metabolismo de lipídeos; biotina – assimilação de CO ₂ e descarboxilação; tiamina – descarboxilação do piruvato e oxidação de alfaetoácidos. Componente da glutatona e de hormônios. Pontes de bissulfato, -S-S-, participam de estruturas terciárias de proteínas. Formação de óleos glicosídicos e compostos voláteis. Formação de nódulos das leguminosas. Ferredoxina – assimilação do CO ₂ , síntese da glicose e do glutamato, fixação do N ₂ , redução do nitrato.
MICRONUTRIENTES	
Boro	Relacionado com crescimento do meristema, diferenciação celular, maturação, divisão e crescimento – necessário para a síntese de uracila, parte do DNA Tem influência no crescimento do tubo polínico. Proteção do ácido indolilacético oxidase. Bloqueio da via da pentose fosfato, o que impede a formação de fenóis. Biossíntese de lignina.
Cloro	Exigido para a decomposição fotoquímica da água (reação entre H e Cl): aumenta a liberação de O ₂ e a fotofosforilação. Transferência de elétrons do OH para a clorofila b no fotossistema II.
Cobalto	Parte da coenzima da vitamina B12 – fixação simbiótica do nitrogênio. Ativação da isomerase da metilmalonil CoA – síntese do núcleo pirrólico. Outras enzimas ativadas: mutase de glutamato, desidratase do glicerol, desidratase do diol, desaminase de etanolamina, mutase de lisina.
Cobre	Plastocianina – enzima envolvida no transporte eletrônico do fotossistema II. Mitocôndrios – oxidases do citocromo – parte da via respiratória. Outras enzimas – redução do O ₂ a H ₂ O ₂ ou H ₂ O. Membranas tilacóides e mitocôndrias: fenolases oxidam fenóis que são oxidadas a quinonas. Fenóis e lacase – síntese da lignina. Cloroplastos: três isoenzimas da dismutase de superóxido (SOD) – proteção da planta contra o dano do superóxido (O ₂ ⁻) que é reduzido a H ₂ O. Neste caso, a proteína SOD contém os íons Cu e Zn na sua estrutura. Citoplasma e parede celular: oxidase de ácido ascórbico oxidado a dehidroascorbato. Oxidases de aminas: desaminação de compostos com NH ₃ , inclusive poliaminas.
Ferro	Participante de reações de oxi-redução e de transferência de elétrons. Componente de sistemas enzimáticos: oxidases do citocromo, catalases, SOD, peroxidases, ferredoxina (proteínas) exigida para a redução do nitrato e do sulfato, fixação do N ₂ e armazenamento de energia (NADP). Papéis indiretos: síntese da clorofila e de proteínas, crescimento do meristema da ponta da raiz, controle da síntese de alanina.
Manganês	Atua na fotólise da água, no processo de transferência de elétrons que catalisa a decomposição da molécula de H ₂ O. Cofator para: redutases de nitrito e hidroxilamina, oxidase de ácido indolacético, polimerase do RNA, fosfoquinase e fosfotransferases. SOD: neutralização de radicais livres formados na reação de Hill; controle de superóxidos e radicais livres produzidos pelo ozônio e por poluentes da atmosfera. Germinação do pólen e crescimento do tubo polínico.
Molibdênio	Componente essencial da redutase de nitrato (NO ₃ -NO ₂) e da nitrogenase (fixação do N atmosférico). Oxidases de sulfito e de xantina.
Níquel	Hidrogenase – fixação biológica do N, exigência de níquel e selênio. Urease – metal-enzima com Ni. Resistência a doenças (ferrugens).
Selênio	Constituinte do RNA transferido (selenionucleosídeo). Aminoácidos protéicos. Ferredoxina com Se no lugar do S encontrado no sal (pinho).
Zinco	Enzima: anidrase carbônica, SOD, aldolase, sintetase do triptofano, ribonuclease (inibição).

A evolução do consumo de adubos no Brasil pode ser vista na Tabela 3. É crescente também a dependência das importações, como mostram os números apresentados por Daher (2006), em porcentagem do total: 1990 – 36%, 2000 – 63%, 2003 – 64%, 2004 – 68%. O consumo cresceu, pois, mais rapidamente que a produção nacional. O Brasil é o 4º maior consumidor de adubos do mundo, vindo depois, pela ordem, da China, Estados Unidos e Índia. É muito desigual o consumo nas diversas culturas, como se pode ver na Tabela 4, de Daher (2006). Convém notar que os números se referem a quilos do produto e não de nutrientes.

3. ASPECTOS AGRONÔMICOS

São aqui considerados conhecimentos básicos, convencionalmente, os seguintes itens: elementos essenciais, suas funções e interações, papel na formação da colheita, integração nas diversas funções da planta, exigências e repartição. Já foi mencionada a possibilidade de demonstração eventual da essencialidade de outros micronutrientes. Uma questão: elementos benéficos como o silício e o sódio estarão na lista dos essenciais dentro dos atuais critérios? Embora satisfaça o critério direto de essencialidade, o silício ainda não está na lista dos essenciais, fazendo-o por enquanto apenas em Malavolta (2006).

O esquema simples de transporte através da membrana, em que o elemento era carregado, foi substituído por outro (ou outros) mais detalhado, como se observa na Figura 2, reproduzida de Reid e Hayes (2003). Os diferentes transportadores são assim descritos:

- (1) Canal retificado de K (KIRC).
- (2) Canal para efluxo do K (KORC).
- (3) Canal citóssico ativado por despolarização (DACC) – entrada rápida de Ca no citosol para fins de sinalização, entrada de outros cátions divalentes, inclusive micronutrientes.

Tabela 3. Consumo de fertilizante e de calcário no Brasil no período de 1980 a 2005.

Ano	Fertilizante (F)	Calcário (C)	Relação C/F
----- (1.000 t ano ⁻¹) -----			
1980	10.272	9.140	1,12
1981	7.197	7.080	0,98
1982	7.022	6.500	0,93
1983	6.357	ND	-
1984	8.155	11.846	1,45
1985	7.708	11.929	1,55
1986	9.651	14.166	1,47
1987	9.646	15.537	1,61
1988	9.765	16.608	1,70
1989	8.759	14.477	1,65
1990	8.222	11.598	1,41
1991	8.493	10.525	1,24
1992	9.277	15.624	1,68
1993	10.541	19.390	1,84
1994	11.944	20.457	1,71
1995	10.839	12.245	1,13
1996	12.248	14.763	1,21
1997	13.834	17.432	1,26
1998	14.669	16.285	1,11
1999	13.689	15.768	1,15
2000	16.392	19.305	1,18
2001	17.069	17.090	1,00
2002	19.114	22.439	1,17
2003	22.796	26.467	1,27
2004	22.767	26.320	1,56
2005	20.195	16.987	0,84

Fonte: ANDA (2006), ABRACAL (comunicação pessoal).

Tabela 4. Área, adubação e estimativa de entregas de fertilizante por cultura no Brasil no período de 2003 a 2005.

Cultura	Área e adubação						Entregas ³		
	2003		2004		2005		2003	2004	2005
	(1.000 ha)	(kg ha ⁻¹)	(1.000 ha)	(kg ha ⁻¹)	(1.000 ha)	(kg ha ⁻¹)	(1.000 t)	(1.000 t)	(1.000 t)
Soja	21.581	400	23.395	385	21.885	330	8.632	9.007	7.222
Milho ¹	13.064	300	12.270	300	12.631	250	3.919	3.681	3.158
Cana-de-açúcar ²	6.252	465	6.587	420	6.308	450	2.907	2.767	2.839
Café ²	2.455	540	2.543	540	2.545	560	1.326	1.373	1.425
Algodão herbáceo	1.156	900	1.248	850	906	850	1.040	1.061	770
Arroz	3.774	230	4.009	220	3.355	210	868	882	705
Trigo ²	2.496	270	2.797	270	2.359	200	674	755	472
Feijão ¹	4.324	154	3.931	150	4.002	125	666	590	500
Reflorestamento	4.806	80	5.120	80	5.500	80	384	410	440
Batata ¹	143	2.860	138	2.700	135	2.700	409	373	365
Fumo	461	1.050	493	1.050	506	1.000	484	518	506
Laranja ²	822	493	899	450	899	470	405	405	423
Banana	505	320	512	320	513	300	162	164	154
Sorgo	925	200	799	170	797	150	185	136	120
Tomate	60	1.953	60	1.900	58	1.900	117	114	110
Soma	62.824	353	64.801	343	62.399	308	22.179	22.234	19.207
Outras	5.194	119	5.286	101	5.100	90	617	533	459
Total	68.018	335	70.087	325	67.499	291	22.796	22.767	19.666

¹ Consideradas todas as safras colhidas.

² Culturas com plantio e colheita no próprio ano.

³ Quantidade de fertilizante vendida.

Fonte: modificada de DAHER (2006).

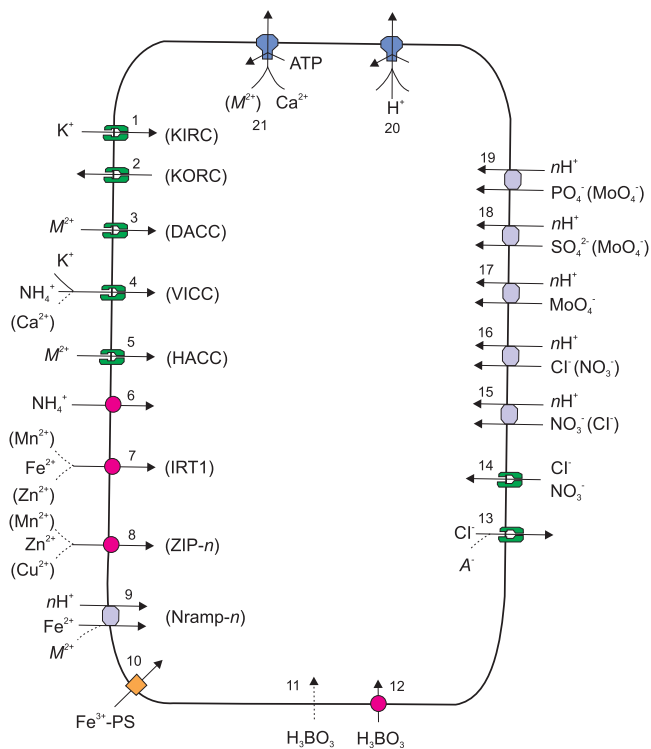


Figura 2. Síntese dos mais prováveis mecanismos de absorção de nutrientes nas plantas.

Símbolos: M^{2+} = cátion metal divalente não específico; A^- = ânion monovalente não específico; elementos entre parênteses indicam que eles não são o substrato primário; n antes de H^+ indica que o número de prótons envolvidos no cotransporte é desconhecido ou variável.

Fonte: REID e HAYES (2003).

- (4) Canais catiônicos insensíveis à voltagem (VICC).
- (5) Canais catiônicos (HACC) ativados por hiperpolarização – absorção de diversos cátions bivalentes.
- (6) Uniporte amínico de alta afinidade, mecanismo desconhecido.
- (7) IRT1 é induzido pela deficiência de Fe e é permeável a outros elementos, como Mn e Zn.
- (8) Os gens ZIP- n são constitutivos e induzidos pela deficiência de Zn, sendo ativos na absorção do Zn e de outros metais, mas não na de Fe.
- (9) Algumas das proteínas Nramp estariam envolvidas na absorção do Fe e de outros micronutrientes catiônicos.
- (10) Absorção do Fe^{3+} com alta afinidade como complexo de fitosideróforos.
- (11) Difusão rápida do ácido bórico não dissociado, exceto quando em baixa concentração externa.
- (12) Transportador de B de alta afinidade ativado pela deficiência de boro.
- (13) Canal para o efluxo de Cl e possivelmente de outros ânions.
- (14) Canal aniônico que pode funcionar com altas concentrações externas, como a de Cl^- em meios salinos.
- (15-19) Simportes H^+ /ânions, possivelmente um para cada nutriente.
- (20) ATPases protônicas – geração do potencial de gradiente protônico, regulação de pH citosólico, excreção de H^+ na rizosfera mobilizando nutrientes.

(21) Ca-ATPases – colaboração com transportadores de Ca de baixa afinidade no tonoplasto para regular a concentração de cálcio no citosol e possivelmente para a saída de outros cátions divalentes.

A lista citada mostra a complexidade do processo de absorção dos elementos individualmente. Pesquisas futuras deverão decifrar os processos e caminhos que operam em uma população de elementos, como a da solução do solo, com a identificação da gama e da estrutura dos transportadores. A complexidade dos processos nas condições “agrícolas” pode ser avaliada nas Figuras 3 e 4 (WELCH, 1995) – a absorção é o resultado da interação harmoniosa entre os componentes do solo e a própria planta.

Ao que parece, já se estabeleceu uma relação estreita entre NMP e genética molecular. Além dos esclarecimentos obtidos a respeito dos processos de absorção (Figura 2), outros exemplos podem ser dados, alguns com implicações práticas.

Schachtman e Barker (1999) descrevem duas aplicações das técnicas de biologia molecular que podem ser usadas para manipular a densidade de micronutrientes na porção comestível das culturas. Uma é o uso de marcadores de DNA para a introgressão de caracteres genéticos; a segunda é a introdução de material genético em um processo de engenharia genética. Graham e Stangoulis (2003) mencionam terem sido identificados um gene principal (maior) e 20 genes menores que aumentam a absorção de Fe pela soja, o que é particularmente observado quando a cultura é cultivada em solos com pH alto. Outra possibilidade da engenharia genética é o aumento do aproveitamento de nutrientes do solo e do fertilizante (OLIVEIRA e MONTAGU, 2003), o que pode ocorrer de diversas maneiras: mudanças na morfologia das raízes, mudanças na rizosfera, efeito nos parâmetros de absorção iônica. As técnicas de biologia molecular e de engenharia genética vieram para ficar, o que não significa, entretanto, que os métodos tradicionais de melhoramento possam ser descartados. Vários casos podem ser lembrados em que interessa “ver” a resposta da planta como um todo.

Há vários aspectos de interesse prático, total ou parcialmente à espera de explicação “molecular” e uso agrícola. Entre outros: resistência ou tolerância ao estresse abiótico (seca, calor, frio, salinidade, comprimento do dia) ou biótico (pragas, moléstias, defensivos tóxicos). Nas condições brasileiras, há interesse particular, entre os fatores abióticos, em genótipos tolerantes à acidez excessiva (excesso de Al, pobreza em Ca e toxidez de Mn). Seria interessante procurar responder à pergunta: qual o gen ou genes que tornam as plantas do cerrado (“pau torto”) tolerantes às condições de acidez? Como transferi-los para a soja ou para o algodão? A alternativa do melhoramento, usando as técnicas tradicionais ou as da engenharia genética, tem que satisfazer uma condição: potencial de colheita igual ou maior que o das variedades usuais em presença de calagem. Ou melhor ainda: apresentar um custo menor de produção.

A eficiência de adubação costuma ser expressa em porcentagem de aproveitamento do adubo ou do elemento aplicado. Como regra, o efeito residual não é levado em conta, com o que a eficiência é subestimada. Devido às perdas por volatilização, lixiviação, fixação, irreversíveis ou parcialmente reversíveis, o aproveitamento do adubo nunca é 100%. A literatura reporta alguns números: N – 60% a 70%, P – 10% a 25%, K – 60% a 70%. A equação geral da adubação pode ser escrita do seguinte modo:

$$M(\text{adubo}) = [M(\text{exigência}) - M(\text{fornecimento})] \times f$$

em que **M** é o elemento, **exigência** é a necessidade da cultura, **fornecimento** é o nutriente disponibilizado pelo solo e **f** é um fator maior que 1, devido às perdas mencionadas.

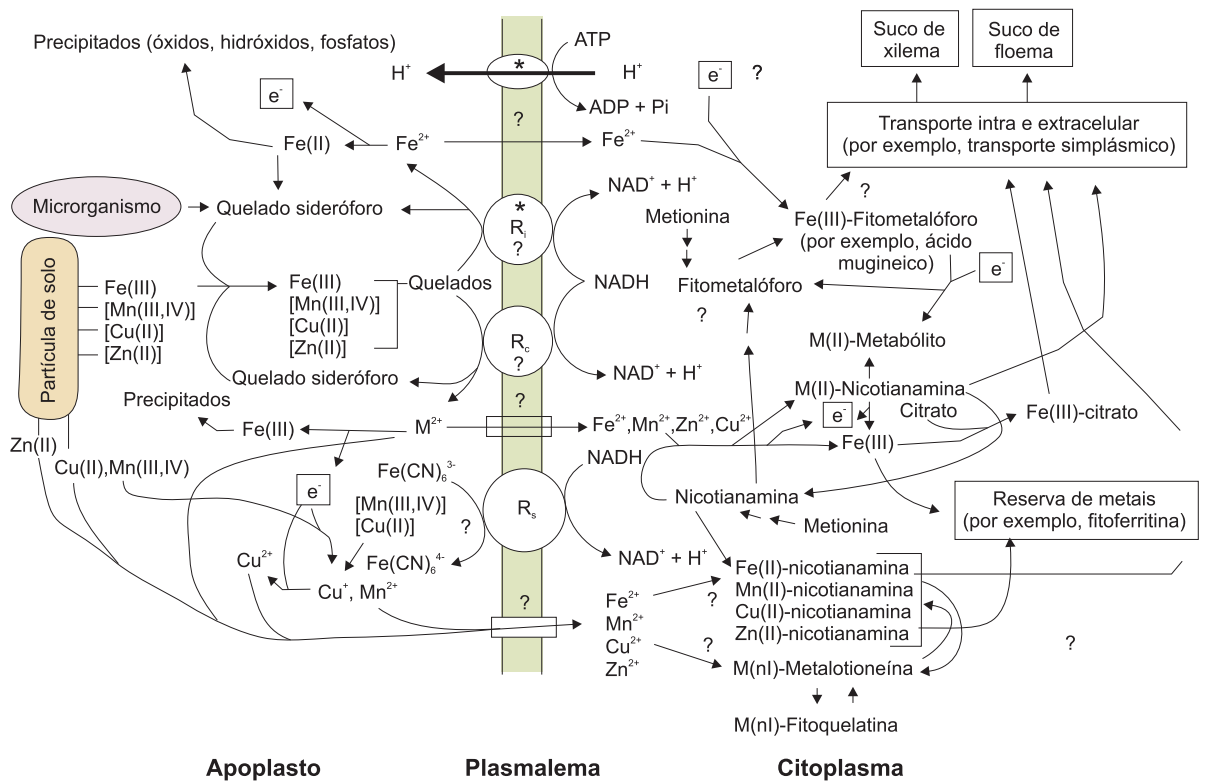


Figura 3. Modelo de absorção de cátions para plantas dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramíneas.

Símbolos: R_i = redutase indutível; R_c = redutase constitutiva; R_s = redutase padrão; caixa retangular = transporte de proteína (canal); círculo = redutases; oval = ATPase - transporte de H^+ para fora do citoplasma; e^- = elétron; ? = desconhecido ou especulativo; * = aumento da atividade em resposta ao estresse por deficiência do micronutriente metal.

Fonte: WELCH (1995).

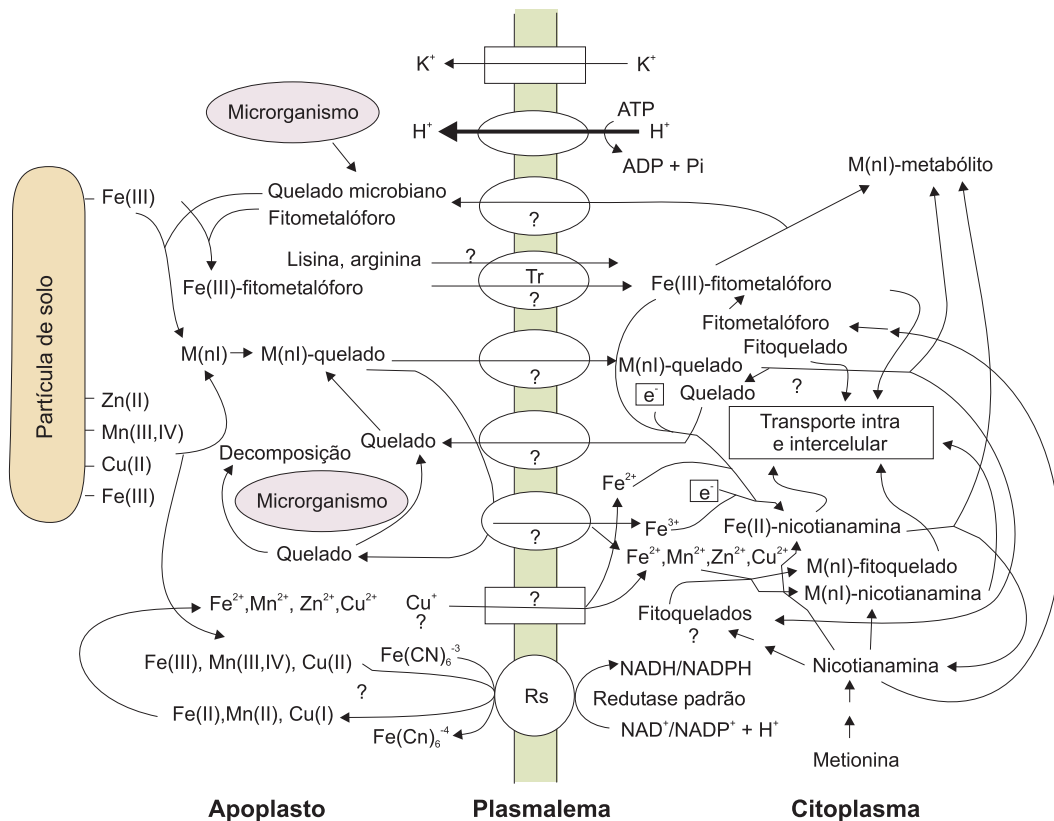


Figura 4. Modelo de absorção de micronutrientes metais para gramíneas.

Símbolos: R_s = redutase padrão; Tr = transporte de proteína; e^- = elétron; círculo = redutase; oval = transporte de proteína; caixa retangular = canal de íon divalente; M(nl) = estado de oxidação variável de acordo com a espécie do metal; ? = desconhecido ou especulativo.

Fonte: WELCH (1995).

Aumentar a eficiência de utilização dos nutrientes significa, pois, fazer f tender a 1. Dois caminhos não mutuamente excluídos podem ser percorridos, como lembra Freney (2005): (1) espécies e cultivares selecionadas ou produzidas que sejam capazes de aumentar a relação entre produto e quantidade de nutriente absorvido; (2) o próprio adubo e seu manejo podem contribuir para fazer f aproximar-se de 1: dose do elemento, modo de aplicação (semente, solo ou folha, no caso dos macronutrientes), localização, época de aplicação e adubo propriamente dito. É evidente que os dois caminhos podem e devem convergir para tirar proveito da interação positiva entre as variáveis de ambos que operam no processo de formação da colheita. Dentro deste contexto, tem-se que levar em conta também outro parâmetro ou característica: a espécie ou cultivar deve ser eficiente e responsiva. Eficiente quer dizer que deve ser capaz de absorver o elemento do solo mesmo quando se encontra em baixa concentração. E deve responder a concentrações mais altas ou a doses maiores de adubo. A eficiência de utilização de nutrientes propriamente dita e a capacidade de resposta podem estar associadas à raiz, em processo de absorção e transporte e distribuição interna.

Dentro do item eficiência da adubação pode-se considerar também novos fertilizantes e novas práticas, ou melhor, fertilizantes ainda não utilizados largamente e práticas também menos utilizadas. Não se trata, pois, nos dois casos, de inovação propriamente dita, embora ali possa ocorrer – é uma questão de imaginação, tecnologia e economia. Hendrie (1976) apresenta uma extensa lista: fosfatos de uréia, produtos para evitar pó e empedramento, fertilizantes feitos com resíduos orgânicos, revestimento com ceras, polímeros e outros, polifosfatos de amônio lentamente solúveis, derivados de uréia formaldeído e outros produtos de liberação lenta de N e outros elementos, como uréia revestida de enxofre elementar. Poderá, ainda, aumentar a incorporação na uréia de inibidores da urease, como o NBPT (fenil fosforodiamidato), o sulfato de cobre e o ácido bórico (KISS e SIMIHAIAN, 2002). Inibidores de nitrificação para diminuir perdas por lixiviação provavelmente serão menos usados que os de urease. A expansão dos adubos fluidos em culturas extensivas deverá ser regulada pela oferta de matéria-prima pela indústria. Se a agricultura de precisão for difundida amplamente, deverá aumentar o número de formulações solicitadas pelos agricultores. Outras tendências de crescimento: adubos de alta solubilidade, como fosfato monoamônio, ácido fosfórico, uréia, nitrato de amônio, nitrato de potássio para aplicação via água de irrigação; aplicação de micronutrientes minerais ou quelados via foliar. Resíduos orgânicos tratados ou não, como lodo de esgoto, compostos, lixo, são outros produtos de uso crescente, embora pequeno diante do volume dos adubos minerais, deverão ser aplicados também, contribuindo para reciclar nutrientes: ambiente e prática agrícola estão envolvidos.

A relação entre NMP e doenças de plantas é outro aspecto agrônomo de interesse. A propósito, veja-se o livro de Datnoff et al. (2007) que descreve o estado da arte. Qual a origem da relação? É conhecido o axioma: um gene, um efeito. Como já se viu, um elemento exerce pelo menos uma função na vida da planta. Sua falta ou não disponibilidade interna provoca uma lesão ao nível molecular: um dado composto não se forma, uma certa reação é inibida. A doença da planta deve começar como uma lesão molecular do mesmo gênero induzida direta ou indiretamente pelo patógeno (fungo, bactéria, vírus, nematóide). O patógeno pode influir na nutrição da planta de diversas maneiras: na absorção, transporte, localização, repartição – nesses casos, há deficiência e dese-

quilíbrio induzido. Desarranjos estruturais de alterações metabólicas no hospedeiro, como as provocadas por deficiências, excessos ou desequilíbrios, podem criar condições mais favoráveis ao desenvolvimento do patógeno. Não se pode concluir, entretanto, que uma planta bem nutrida seja imune ao agente da doença: em igualdade de condições deve ser menos suscetível que a outra com desequilíbrio nutricional. Há muito poucas explicações na literatura sobre a maneira pela qual o patógeno interfere na nutrição mineral. A atenção é voltada para o efeito, de modo geral, e não para a causa. A Tabela 5 resume informações colhidas no livro mencionado. O “amarelinho” é uma doença dos citros atribuída à bactéria *Xylella fastidiosa*. A Tabela 6 mostra os resultados de um ensaio em que mudas inoculadas foram cultivadas em solução nutritiva com e sem adição de nutrientes. Como se pode ver, a omissão de micronutrientes, exceto B e Mn, levou ao aparecimento de sintomas visuais da doença, confirmados pelo teste imunológico. Há duas explicações possíveis: (1) a deficiência do elemento cria condições para o desenvolvimento da bactéria, (2) o micronutriente é tóxico para o microrganismo.

4. ASPECTOS ECONÔMICOS

Como já se viu, a adubação tem a finalidade de fornecer os nutrientes à cultura, atendendo a critérios econômico e ambiental – ar, água, solo.

Para isso, é necessário responder a uma série de perguntas:

- O que e quanto? Elemento e quantidade;
- Quando? Época de aplicação;
- Onde? Localização;
- Efeito na qualidade?
- Efeito no ambiente?
- Pagará?

A última pergunta é fundamental: se a resposta não for afirmativa, de nada adianta responder às demais. Como escreveu o Mestre Frederico Pimentel Gomes:

“É errado supor que o lavrador aduba para aumentar a produtividade das suas terras ou ainda para melhorar o abastecimento do país de alimentos e de matérias-primas vegetais. Fundamentalmente o lavrador aduba para aumentar a sua receita líquida, para melhorar o seu padrão de vida, para ganhar mais dinheiro. O aumento de produtividade proporcionado pelo adubo só será vantajoso para o agricultor e para a nação se tiver sentido econômico”.

Dentro de limites, há uma relação direta entre dose de adubo e produção. Para Justus von Liebig, a relação corresponderia a uma linha reta, o que os dados experimentais mostraram não ser a regra. De acordo com E. A. Mitscherlich, a relação é descrita pela equação que corresponde à lei dos retornos decrescentes:

$$y = A[1 - 10^{-C(x + b)}]$$

em que:

y = colheita obtida com:

x = dose de adubo

A = colheita máxima (parâmetro)

C = coeficiente de eficácia do adubo (parâmetro)

b = reserva do elemento no solo (parâmetro).

A dose do elemento que dá colheita econômica máxima (CEM) é calculada pela equação de Pimentel Gomes:

Tabela 5. Algumas relações entre nutrição mineral e doenças de plantas.

Elemento	Condição	Efeito	Consequência
Nitrogênio	Deficiência	Alterações no N total, aminoácidos, fenóis, celulose, suculência	Menor resistência
Fósforo	Presença	Aumento no teor: maior vigor	Maior resistência
Potássio	Presença	Maturação adiantada, mais proteínas, permeabilidade de membranas, silificação	Maior resistência
Cálcio	Presença	Lamela média, inibição de pectinas do patógeno	Maior resistência
Magnésio	Presença	Inibição de enzimas proteolíticas do patógeno	Maior resistência
Enxofre	Presença	Produção de H-S em resposta à infecção tóxica do patógeno. Cisteína precursora de fitoalexinas. Parte de antibiótico de baixo peso molecular	Maior resistência
Boro	Presença	Tóxico para fungos. Manutenção do Ca na parede celular	Maior resistência
	Deficiência	Lamela média desorganizada: entrada de patógeno	Menor resistência
Cloro	Presença	Tóxico para o patógeno	Maior resistência
Cobre	Presença	Toxidez direta para o patógeno. Redução da síntese de flavonóides. Expressão de genes de resistência	Maior resistência
Ferro	Presença	Sideróforos no solo tóxicos para o patógeno	Maior resistência
	Deficiência	Maior atividade de enzimas que degradam a parede celular	Menor resistência
Manganês	Deficiência	Gene resistente ao glifosato: indução da deficiência e maior dano	Menor resistência
	Presença	Síntese de compostos tóxicos ao patógeno	Maior resistência
Molibdênio	Presença	?	
	Deficiência	?	
Níquel	Presença	Maior quantidade de fitoalexinas	Maior resistência
	Deficiência	Desorganização do metabolismo dos ureídeos – vias metabólicas para resistência a doenças	Menor resistência
Zinco	Presença	Em camada abaixo da epiderme, maior resistência da parede celular Menor atividade da quitinase do patógeno	Maior resistência
Alumínio	Presença	Efeito fungistático. Inibição do patógeno. Indireto: entrada na lamela média	Maior resistência

Fonte: DATNOFF et al. (2007).

$$x^* = 1/2 x_u + 1/c \log \frac{w_u}{t x_u}$$

em que:

x^* = dose mais econômica do elemento

x_u = dose do fertilizante que aumenta a produção em u

c = parâmetro

u = aumento da produção em relação à testemunha não adubada

w = preço unitário do elemento

t = preço unitário do produto.

O trinômio do 2º grau também é usado para representar a relação entre x e y :

$$y = a + bx - cx^2$$

em que: a, b, c = parâmetros.

Esse modelo, entretanto, tem o defeito de representar uma simetria que os dados experimentais, em geral, não mostram. Para calcular a dose mais econômica faz-se a derivada igual a zero e iguala-se à relação w/t .

A Tabela 7 mostra o resultado do cálculo de x^* em ensaios de adubação conduzidos no Brasil Central nos anos 60.

As recomendações de adubação empregadas no Brasil, de modo geral, baseiam-se na análise do solo e levam em conta o tamanho da colheita. O aspecto econômico não é avaliado, com poucas exceções. Pode-se admitir, pois, que o lavrador não esteja obtendo

Tabela 6 – Nutrição e incidência de amarelinho em mudas cultivadas em solução nutritiva¹.

Tratamento	Avaliação		Tratamento	Avaliação	
	Visual	Dot blot ²		Visual	Dot blot
Completo	0	0	Menos B	0,66	0
Baixo N	0,33	1,5	Menos Cu	2,44	1,5
Baixo P	0,44	0	Menos Fe	1,99	2,5
Baixo K	0,99	0	Menos Mn	1,99	0
Baixo Ca	0,22	0	Menos Mo	2,10	2,0
Baixo Mg	1,44	0,5	Menos Zn	2,44	3,0
Baixo S	1,11	0			

¹ Escala 0-5: 0 = mínimo; 5 = máximo.

² Teste imunológico.

Fonte: MALAVOLTA (1998, trabalho não publicado).

Colheita Econômica Máxima (CEM) e, portanto, não realizando todo o lucro possível. Por outro lado, o efeito residual do adubo não é considerado, a não ser indiretamente através da análise do solo e eventualmente da folha.

Entre as perguntas a responder está o efeito na qualidade do produto agrícola definida de modo prático: conjunto de características que aumentam o valor comercial ou nutritivo do produto ou o conjunto dos dois. Café que bebe “mole” vale mais no merca-

Tabela 7. Resumo dos resultados obtidos em ensaios e demonstração conduzidas no Brasil Central no período de 1969-1976¹.

Cultura	Nº de ensaios	Média local (kg ha ⁻¹)	CEM ² (kg ha ⁻¹)	Saída/Entrada kg produto/kg NPK ³
Arroz	1.676	1.282	2.783	8,3
Milho	1.417	1.400	4.853	19,1
Soja	850	1.060	1.793	4,1
Feijão	756	500	1.153	3,6

¹ Programa ANDA/BNDE/FAO.

² CEM = colheita econômica máxima.

³ Dose média, em kg ha⁻¹: N e K₂O = 45; P₂O₅ = 90.

Fonte: MALAVOLTA e ROCHA (1981).

do que café com outra classificação. Há, porém, outro aspecto que começa a ser considerado: a importância da Nutrição Mineral das Plantas e do seu veículo, a adubação, para a alimentação humana. De acordo com a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2004), 4-5 bilhões de pessoas podem sofrer de deficiência de ferro e, do total, cerca de 2 bilhões são, por isso, anêmicas. De acordo com Hotz e Brown (2004), um quinto da população mundial pode não estar recebendo zinco suficiente nos alimentos consumidos. Entre 0,5 e 1 bilhão de pessoas podem ter carência de selênio. Este enfoque adicional na prática da adubação foi objeto da revisão de Dibb et al. (2005). No que tange aos micronutrientes, o que se pretende é a biofortificação do produto, em geral do grão. A adubação, fornecendo estes elementos, é uma alternativa, particularmente se associada a variedades eficientes na absorção, transporte e compartimentação do elemento na parte comestível da planta. O aspecto economicamente favorável desta opção é discutido por Bouis (1999). Uma segunda aproximação é a molecular (SCHACHTMAN e BARBER, 1999): uso de marcadores de DNA para a introgressão de características desejáveis; a segunda consiste na introdução de material genético definido no processo de engenharia genética.

5. ASPECTOS AMBIENTAIS

Duas perguntas: os fertilizantes causam danos ao meio ambiente – ar, água, solo? Os fertilizantes introduzem substâncias ou elementos prejudiciais à saúde do animal e do homem?

Um resumo, tão objetivo quanto possível, será dado em seguida, tratando dos aspectos mais pertinentes.

5.1. Ar

O enfoque neste caso é a participação da agricultura e do fertilizante em geral na emissão dos gases de efeito estufa (GEE) no aquecimento global – CO₂, CH₄, N₂O, NH₃, CFC.

A Tabela 8, de Norse (2003), mostra a contribuição da agricultura para a emissão dos GEE. No total, a agricultura contribui com cerca de 30%, o restante sendo debitado a outras fontes, em particular combustíveis fósseis. Dentro de cada componente a participação dos adubos minerais é menor que a de outras fontes, exceto no caso da amônia, o que, entretanto, pode ser largamente atribuído ao uso inadequado de adubos nitrogenados.

Várias práticas agrícolas podem ser usadas para reduzir ou eliminar as emissões, como lembra Bruinsma (2003).....

O papel positivo da nutrição mineral no manejo de nutrientes pode conseguir, por exemplo: a) redução do impacto da agricultura na mudança climática via diminuição na emissão de gases de efeito estufa (GEE); b) aumento na produtividade das culturas e pastagens e, assim, diminuir a necessidade de desflorestamento e de drenagem de áreas úmidas, reduzindo a emissão de óxidos de nitrogênio dos adubos minerais e orgânicos; e c) aumento no seqüestro de carbono através de várias práticas, como plantio direto e melhora da estrutura do solo mediante elevação do teor de matéria orgânica. Os solos do mundo inteiro, de acordo com Melfi (2005), contém 1.500-2.000 gigatoneladas de C, a atmosfera tem 750 gigatoneladas e a vegetação possui 470-655 gigatoneladas de C.

A Tabela 9, de Bruinsma (2003), quantifica a contribuição da agricultura para o seqüestro de carbono.

No plantio direto há aumento do seqüestro. Estima-se que em 2030 serão cultivados 150-217 Mha, desse modo representando

Tabela 8. Participação da agricultura nas emissões globais de gases de efeito estufa (exceto gás carbônico).

Gás	Efeitos	Fontes	Contribuição estimada em relação a	
			Emissões globais totais (%)	Fontes antropogênicas totais (%)
Metano	Mudança no clima	Ruminantes	15	
		Cultura de arroz	11	49
		Queima da biomassa	7	
Óxido nitroso	Mudança no clima	Gado*	17	
		Adubos minerais	8	66
		Queima da biomassa	3	
Óxido nítrico	Acidificação	Queima da biomassa	13	
		Adubos minerais e orgânicos	2	27
Amônia	Acidificação	Gado	44*	
	Eutroficação	Adubos minerais	17	93
		Queima da biomassa	11	

* Inclui esterco.

Fonte: modificada de NORSE (2003).

Tabela 9. Estimativa do seqüestro anual de carbono nas terras cultivadas.

Região	C total (Mt)		C (t ha ⁻¹)	
	1997/99	2030	1997/99	2030
África Subsahariana	34-67	74-147	0,30-0,60	0,47-0,95
América Latina e Caribe	62-124	110-220	0,66-1,33	0,83-1,65
Oriente Próximo e África do Norte	27-54	46-91	0,52-1,04	0,75-1,50
Sul da Ásia	97-194	168-337	0,53-1,07	0,87-1,73
Leste da Ásia	182-363	267-534	0,84-1,69	1,17-2,34
Países industrializados	168-336	227-455	0,90-1,80	1,16-2,32
Países de transição	49-97	64-128	0,45-0,90	0,53-1,05
Mundo	618-1.236	956-1.912	0,65-1,30	0,88-1,76

Fonte: BRUINSMA (2003).

30 Mt de C/ano adicionais. Outros benefícios: economia de terra, menor erosão, menor consumo de combustíveis fósseis. Nota-se que o plantio direto, mais que o convencional, apresenta maior contribuição para o seqüestro de C e para a economia de terra – aspecto que será tratado também em um outro contexto, uma soma e não uma substituição, e talvez uma interação positiva.

A adubação, veículo da nutrição mineral, pode contaminar a água potável? O acidente, neste caso, é a chamada eutrofização, a qual é atribuída ao nitrato e ao fosfato do adubo (e do solo) que aumenta o teor dos mesmos, “enriquecendo” lagos, lagoas e reservatórios, o que leva ao desenvolvimento de algas e à mortalidade de peixes. O elevado teor de N-NO₃⁻ na água de beber, no alimento ou na forrageira pode produzir nitrito (NO₂⁻) no tubo digestivo. O NO₂⁻ se combina com a hemoglobina do sangue produzindo metemoglobina, que é incapaz de transportar O₂, causando doença (metemoglobinemia), especialmente em bebês (MALAVOLTA e MORAES, 2007)

NOTA DO EDITOR:

O Professor Eurípedes Malavolta infelizmente faleceu no dia 19 de Janeiro de 2008, deixando inacabado este artigo. A equipe de publicação do IPNI Brasil se esforçou ao máximo no sentido de ser fiel aos manuscritos, de forma a manter sua originalidade. Foi decisão da equipe simplesmente finalizar o artigo com reticências, exatamente no local onde o Professor interrompeu seu trabalho. Agradecemos aos colegas Milton Ferreira de Moraes, José Lavres Júnior e Denis Herisson da Silva, orientados do Professor, pela presteza no esclarecimento de algumas dúvidas.

REFERÊNCIAS

- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2006**. São Paulo, 2006. p. 34.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantities for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, p. 371-375, 1939.
- BOUIS, H. Economics of enhanced micronutrient density in food crops. **Field Crops Research**, v. 66, p. 165-175, 1999.
- BRUINSMA, J. (Ed.). **World agriculture: towards 2015/2030**. An FAO perspective. London: Earthscan Publications Ltd., 2003. 432 p.
- DAHER, E. Mercado de fertilizantes – situação atual e futura. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DE FERTILIZANTES, 1., Petrobras, Rio de Janeiro, 2006. CD ROM.
- DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H.; HUBER, D. M. (Ed.). **Mineral nutrition and plant disease**. Saint Paul: The American Phytopathological Society, 2007. 278 p.

- DIBB, D. W.; ROBERTS, T. L.; WELCH, R. M. Da quantidade para a qualidade – a importância da fertilização na nutrição humana. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 111, p. 1-6, 2005.
- EPSTEIN, E.; LEGGETT, J. E. The absorption of alkaline earth cations by barley roots: kinetics and mechanisms. **American Journal of Botany**, v. 41, p. 785-796, 1954.
- FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. 600 p.
- FRENEY, J. R. Options for reducing the negative effects of nitrogen in agriculture. **Science in China**, v. 48, p. 861-870, 2005. (Series C: Life Sciences)
- GRAHAM, R. D.; STANGOULIS, J. C. R. Trace element uptake and distribution in plants. **American Society of Nutritional Sciences**, p. 1502S-1504S, 2003.
- HENDRIE, R. A. **Granulated fertilizers**. New Jersey: Noyes Date Corporation, 1976. 338 p. (Chemical Technology Review, n. 58)
- HOTZ, C.; BROWN, R. H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 25, n. 1, p. 5.130-5.162, 2004. (Supplement 2)
- KISS, S.; SIMIHAIAN, M. **Improving efficiency of urea fertilizers by inhibition of soil urease activity**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 417 p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 2006. 638 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola – adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 1981. 596 p.
- MALAVOLTA, E. **Mineral nutrition of higher plants – the first 150 years**. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIM, V.; FURTINI, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Viçosa: Lavras, 1999. p. 51-122.
- MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: Internacional Plant Nutrition Institute, 2007. 722 p.
- MALAVOLTA, E.; ROCHA, M. Recent Brazilian experience on farmer reaction and crop response to fertilizer use. In: USHERWOOD, N. R. (Ed.). **Transferring technology for small scale farming**. Madison: American Society of Agronomy, 1981. p. 101-113.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas – princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 309 p.
- MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F.; LAVRES JÚNIOR, J.; MALAVOLTA, M. Micronutrientes e metais pesados - essencialidade e toxidez. Cap.4, p.117-154. In: PATERNIANI, E. (Ed.). **Ciência, agricultura e sociedade**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 403 p.
- MELFI, A. J. Soil, sugar and carbon sinks. **TWAS Newsletters**, v. 17, n. 4, p. 35-39, 2005.
- NORSE, D. **Fertilizers and world food demand implications for environmental stresses**. Proceedings of the IFA-FAO Agriculture Conference Global Food Security and the Role of Sustainable Fertilization. Rome, 2003. 13 p.
- OLIVEIRA, D. E. de.; MONTAGU, M. van. Biotechnology in concert with plant nutrient management. In: JOHNSTON, A. E. (Ed.). **Feed the soil to feed the people – the role of potash in sustainable agriculture**. Basel: International Potash Institute, 2003. p. 197-208.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (Boletim técnico, 100)
- REID, R.; HAYES, J. Mechanisms and control of nutrients uptake in plants. **International Review of Cytology**, v. 229, p. 73-114, 2003.
- RÖMHELD, V. W. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 71-86.
- SCHACHTMAN, D. P.; BARKER, S. J. Molecular approaches for increasing the micronutrient density in edible portions of food crops. **Field Crops Research**, v. 60, p. 181-192, 1999.
- WELCH, R. M. Micronutrient nutrition of plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 14, n. 1, p. 49-82, 1995.
- WHO. World Health Organization. **Micronutrient deficiencies**. Health Topics, Nutrition. 2004. Disponível em: <www.who.int/nut/#mic>
- ZHANG, W.; ZHANG, X. A forecast analyses on fertilizer consumption worldwide. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 133, n. 1-3, p. 427-434, 2007.