

Fertilidade do Solo e Demanda por Nutrientes no Brasil

6

Capítulo

Alberto Carlos de Campos Bernardi
Pedro Luiz O. de A. Machado
Carlos Alberto Silva

Introdução

A grande maioria dos solos do Brasil é ácida e pobre em nutrientes para o crescimento das principais culturas. Assim, a fertilidade natural dos solos é baixa e não há reservas de nutrientes suficientes para sustentar produtividades ótimas destas culturas. A agricultura moderna preconiza a aplicação de insumos, como fertilizantes e corretivos, para eliminar as limitações químicas dos solos e atender às exigências nutricionais das culturas.

Embora o Brasil venha atingindo recordes de produtividade de grãos, muitas culturas, principalmente aquelas que se constituem em produtos da cesta básica (milho, feijão, trigo, arroz e mandioca) ainda apresentam produtividades médias muito abaixo do chamado ponto de máximo rendimento econômico. Há disponibilidade de tecnologia gerada pela pesquisa agrônoma brasileira, mas, como exposto por Lopes e Guilherme (2001), deve-se investir em ações que permitam elevar as médias da produtividade das principais culturas. Baixa produtividade das culturas é o caminho mais curto para a abertura de novas áreas por meio do desmatamento. Será possível constatar neste capítulo que, no Brasil, há uma histórica falta de adubação do solo.

O fornecimento de nutrientes para as principais plantas cultivadas no Brasil é efetuado principalmente pela adubação mineral e orgânica. Ambos são importantes para o sucesso do empreendimento agrícola ou florestal. Até à década de 1950, a produção da agricultura brasileira dependia praticamente da fertilidade natural dos solos, que, na sua maioria é baixa pela alta acidez e presença de teores tóxicos de alumínio para as principais culturas. As práticas

modernas de adubação, introduzidas há mais de um século e baseadas no conceito químico de nutrição de plantas, contribuíram significativamente para o aumento na produção agrícola, resultando na melhor qualidade de alimentos, florestas e forrageiras. A melhoria da fertilidade dos solos resultando em níveis mais estáveis de produtividade das lavouras, assim como numa melhor resistência (induzida pela melhor nutrição vegetal) contra pragas e doenças podem ser considerados como benefícios paralelos da prática da adubação balanceada. A adubação combinada com o uso de variedades mais produtivas contribui para o aumento da produtividade e para os retornos econômicos aos agricultores, independentemente do tamanho da propriedade rural. O aumento na produtividade média das culturas no período de 1970-1998, resultou numa economia de cerca de 60 milhões de hectares (Figura 1).

Deste modo, o objetivo deste estudo foi o de elaborar um diagnóstico do balanço de nutrientes na agricultura brasileira atual e apresentar alternativas ecologicamente viáveis de fornecimento de nutrientes.

Nutrientes exigidos pelas culturas

As plantas contêm praticamente todos os elementos químicos (92), mas necessita apenas 16 para o crescimento adequado. Treze são elementos nutritivos minerais essenciais comumente denominados de nutrientes. Eles são fornecidos pelo solo e pelo adubo mineral ou orgânico. Há alguns nutrientes como sódio, silício e cobalto que têm efeito benéfico para algumas culturas, mas não são essenciais (Box 1).

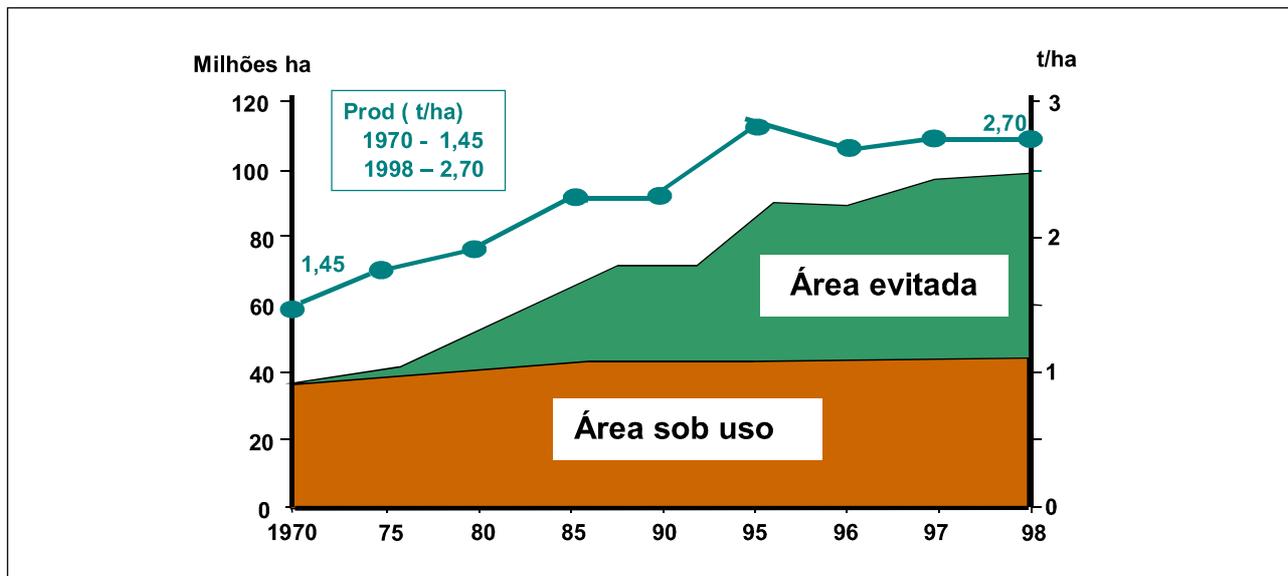


Figura 1. Economia de uso de área agrícola no Brasil no período de 1970-1998, em função do acréscimo da produtividade média das culturas (Lopes e Guilherme, 2001)

Box 1. Nutrientes essenciais e benéficos para as plantas

Nutrientes essenciais (13) exigidos para o crescimento (todos importantes):

- **Macronutrientes (6)**

- ❖ Macronutrientes primários (3), aplicados na forma de adubos para a quase totalidade das culturas na maioria dos solos

N = nitrogênio (absorvido na forma de NO_3^- ou NH_4^+)

P = fósforo (absorvido na forma de H_2PO_4^- etc)

K = potássio (absorvido na forma de K^+)

- ❖ Macronutrientes secundários (3), aplicados na forma de adubos para algumas culturas em alguns solos:

S = enxofre (absorvido na forma de SO_4^{2-})

Ca = cálcio (absorvido na forma de Ca^{2+})

Mg = magnésio (absorvido na forma de Mg^{2+})

- **Micronutrientes (7)**

- ❖ Metais pesados (5)

Fe = Ferro

Mn = Manganês

Zn = Zinco

Cu = Cobre

Fe, Mn, Zn, Cu são absorvidos na forma de cátions bivalentes (ex. Zn^{2+}) ou quelatos.

Mo = molibdênio absorvido na forma de molibdato (MoO_4^{2-})

- ❖ Não-metais

Cl = cloreto, absorvido na forma de Cl^-

B = boro absorvido na forma de H_2BO_3^-

Solos do Brasil e suas limitações

Conforme exposto no Capítulo 1, o território brasileiro é caracterizado por uma grande diversidade de tipos de solos condicionados pelas diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos associados. Existe uma grande predominância de Latossolos e Argissolos, os quais ocupam respectivamente 39 e 20% do território nacional.

As principais limitações físicas e químicas ao desenvolvimento da agropecuária na América Tropical, sua extensão e porcentagem de ocorrência foram apresentadas por Sanchez e Salinas (1981), e estão ilustradas na Tabela 1. Devido às dimensões continentais, estas limitações apresentadas, principalmente as relacionadas aos solos ácidos, são representativas dos solos do Brasil. Além dos problemas já citados, destacam-se ainda as baixas disponibilidades dos macronutrientes primários (N, P e K), secundários (Ca, Mg e S), e de micronutrientes (Zn e Cu). Existem também grandes extensões de solos ácidos com baixa CTC e alto poder de fixação de fósforo, assim como elevada acidez trocável (Al^{3+}). Com relação às limitações físicas há, para o Brasil, problemas com o alto risco de erosão (ver Cap. 5).

USO DE FERTILIZANTES

Uso mundial

O consumo de fertilizantes no mundo tem sido sistematicamente avaliado por 3 organizações: IFA – Inter-

national Fertilizer Industry Association, IFDC – International Development Center e FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. O levantamento mais recente (FAO, 1999), mostra que as culturas do trigo, arroz e milho consomem 50% do total de fertilizantes no mundo. Somados os consumos com pastagens, hortaliças, algodão, soja e cana-de-açúcar este valor fica próximo de 80%.

Os principais consumidores mundiais de fertilizantes estão na Tabela 2. Observa-se que o Brasil ocupa a 5ª posição. Além destes países destacam-se ainda Paquistão, Inglaterra, Espanha, Itália, México, Turquia, Japão, Rússia, Polônia, Tailândia, por apresentarem consumo acima de 1 milhão de toneladas de fertilizantes por ano. Estes resultados mostram que a maior parte do consumo de fertilizantes está em países situados no Sul e Leste da Ásia, América do Norte, e Europa ocidental.

Considerando a relação de consumo de N: P_2O_5 : K_2O , observa-se que no Brasil ela é de 1:1,43:1,60. Já na China é de 8,4:3,2:1, EUA, 2,7:1:1,2; Índia, 8,5:2,5:1; e França, 2,4:1:1,4. Tem-se no Brasil um dos menores consumos proporcionais de fertilizantes nitrogenados, sendo um indicativo das baixas produtividades observadas no país. Esta relação de consumo é histórica, e segundo Yamada e Lopes (1999) é, em média, 1: 1,43: 1,55.

Uso de adubos no Brasil

Como exposto anteriormente, os solos brasileiros são em geral ácidos, pobres em fósforo, cálcio, magnésio e com

Tabela 1. Extensão geográfica das maiores limitações na América tropical.

Limitações do solo	América tropical		Solos ácidos	
	1.000.000 ha	% total	1.000.000 ha	% total
Deficiência N	1332	89	969	93
Deficiência P	1217	82	1002	96
Deficiência K	799	54	799	77
Deficiência Ca	732	49	732	70
Deficiência Mg	731	49	739	70
Deficiência S	756	51	745	71
Deficiência Cu	310	21	310	30
Deficiência Zn	741	50	645	62
Alta fixação P	788	53	672	64
CTC efetiva baixa	620	41	577	55
Toxidez Al	756	51	756	72
Baixa disponibilidade de água	626	42	583	56
Alto risco erosão	543	36	304	29
Encharcamento	306	20	123	12
Compactação	169	11	169	16
Laterização	126	8	81	8
Estresse hídrico (> 3 meses)	634	42	299	29

Tabela 2. Área cultivada, proporção da área que recebe fertilizantes e o consumo total de fertilizantes dos principais países consumidores.

País	Área Cultivada (1.000 ha)	% área fertilizada			Taxa de aplicação			Consumo			
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total
		(%)			(kg ha ⁻¹)			(1.000 Mt)			
China ^(b)	157.132	98,0	80,2	49,4	108,9	57,6	43,3	18.816	7.255	2.248	28.319
EUA ^(d)	112.775	90,6	66,4	62,5	128,4	85,1	110,6	11.185	4.145	4.871	20.200
Índia ^(c)	173.739	83,0	83,0	83,0	108,6	31,4	8,4	9.823	2.898	1.156	13.876
França ^(d)	26.562	-	-	-	87,9	46,0	80,7	2.525	1.052	1.488	5.065
Brasil ^(d)	44.402	83,7	83,7	83,7	43,0	67,6	64,8	1.197	1.708	1.941	4.847
Alemanha ^(d)	15.993	-	-	-	98,2	37,6	67,3	1.758	415	646	2.819
Indonésia ^(a)	16.406	60,0	50,0	27,5	70,0	23,8	52,5	1.558	540	219	2.317
Canadá ^(a)	32.841	77,0	77,0	77,0	60,0	36,5	32,5	1.426	637	317	2.379

Ano dos dados levantados: ^(a)1993; ^(b) 1994; ^(c) 1995; e ^(d) 1996.
Fonte: FAO (1999).

teores altos de alumínio. No entanto, aplica-se muito menos fertilizante e corretivo que o recomendado. Observa-se que apenas nas culturas da soja e cana-de-açúcar há uma utilização mais abrangente de fertilizantes, sendo que as taxas médias de adubação estão na faixa de 95 e 97%, respectivamente. As demais as taxas de fertilização não ultrapassam os 88% da área total (Tabela 03).

Os dados apresentados pela FAO (1999) mostraram que as culturas que mais utilizaram fertilizantes são soja (24%), milho (23%), cana-de-açúcar (21%), seguidas pelo café, arroz, feijão, trigo, laranja, batata e algodão. Essas 10 culturas consomem aproximadamente 94% dos fertilizantes do País (Tabelas 2 e 3). Os dados mostrados por Yamada e Lopes (1999) corroboram estas constatações.

Embora responsável por 75% do consumo total de fertilizantes (N, P₂O₅ e K₂O) na América Latina,

o Brasil ainda não ultrapassou o consumo de 5,0 milhões de toneladas anuais (período 1970 a 1989), sendo que entre 1989 e 1999 o consumo aumentou apenas 800 mil toneladas, atingindo 5,8 milhões de toneladas. O consumo de fertilizante nitrogenado, entre 1970 e 1989, foi de 0,5 a 0,9 milhão de tonelada por ano e entre 1989 e 1999 houve um aumento para cerca de 1,5 milhão tonelada por ano (Figura 2). As quedas no consumo se relacionam a problemas de crédito, frustração de safras e baixos preços dos produtos agrícolas, enquanto os aumentos envolvem geralmente relação de troca favorável entre fertilizantes e produtos agrícolas associados a safras satisfatórias quanto à produtividade.

A Tabela 4 mostra o consumo aparente de fertilizantes e matérias primas no Brasil no período de 1991 a 2000. A principal fonte de fertilizante nitroge-

Tabela 3. Área plantada das principais culturas no Brasil, porcentagem da área fertilizada, taxa de aplicação e utilização total de nutrientes, dados referentes a 1996.

Culturas	Área	% Área	Taxa de aplicação			Consumo			
	Cultivada	Fertilizada	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total
	1.000 ha		kg ha ⁻¹			1.000 Mt			
Milho	13.888	76	35	36	36	369,4	380,0	380,0	1.129,4
Soja	11.376	97	5	51	51	55,2	562,8	562,8	1.180,8
Feijão	4.939	68	11	21	12	36,9	70,5	40,3	147,7
Cana-de-açúcar	4.902	95	70	56	95	326,0	260,8	442,4	1.029,2
Arroz	3.605	76	30	46	27	82,2	126,0	74,0	282,2
Café	2.021	84	97	24	97	164,7	40,7	164,7	370,1
Trigo	1.837	83	8	41	41	12,2	62,5	62,5	137,2
Laranja	971	85	55	28	55	45,4	23,1	45,4	113,9
Algodão	682	85	26	49	49	15,1	28,4	28,4	71,9
Batata	181	88	93	324	185	14,8	51,6	29,5	95,9
Total	44.402	-	-	-	-	1.121,9	1.606,5	1.829,9	4.558,2

Fonte: FAO (1999).

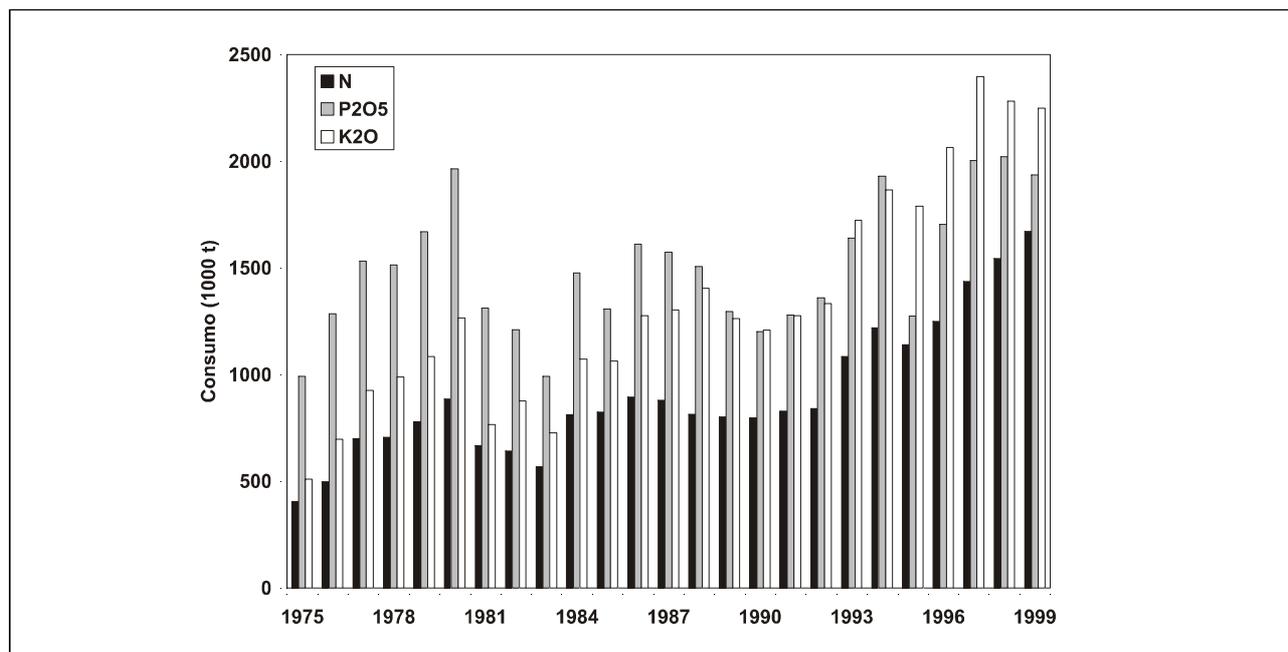


Figura 2. Consumo de fertilizante N, P₂O₅ e K₂O no Brasil no período de 1975 a 1999.
Fonte: FAO (1999).

Tabela 4. Consumo aparente de fertilizantes, nutrientes e matérias primas no Brasil no período de 1991 a 2000.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Fertilizantes (1000 t)										
Sulfato de amônio	921	843	960	918	1.077	1.239	1.347	1.195	1.365	1.864
Uréia	868	942	1.298	1.278	1.284	1.407	1.672	1.570	2.155	2.250
Nitrato de amônio	199	213	216	270	327	374	423	396	346	711
Superfosfato simples	2.145	2.267	2.812	2.954	2.707	2.949	3.529	3.701	3.650	4.297
Superfosfato triplo	776	755	701	844	653	774	945	844	760	937
Fosfato mono-amônio (MAP)	553	583	975	1.060	1.058	1.210	1.496	1.519	1.616	2.045
Fosfato di-amônio (DAP)	123	110	128	157	91	76	80	63	35	175
Fosfato parcialmente acidulado	93	119	131	144	171	89	49	37	-	8
Cloreto de potássio	2.071	2.175	2.851	2.802	2.369	3.384	3.955	3.619	3.733	4.784
Outros	824	914	895	787	658	866	887	608	423	474
Total	8.573	8.921	10.967	11.214	10.395	12.368	14.383	13.552	14.083	17.545
Matérias primas (1000 t)										
Amônia	940	938	821	1.016	1.011	1.000	1.147	876	1.099	989
Ácido fosfórico	649	520	659	619	630	646	640	647	627	817
Ácido sulfúrico	2.452	2.066	2.221	2.631	2.776	2.397	3.026	3.161	3.070	3.543
Enxofre	1.021	843	887	1.133	1.167	1.172	1.229	1.208	1.349	1.335
Total	5.062	4.367	4.588	5.399	5.584	5.215	6.042	5.892	6.145	6.684

Fontes: IBGE; SECEX/MDIC; ANDA; SIACESP

nado utilizada é a uréia, apesar dos grandes problemas de perdas por volatilização quando aplicado em superfície ou sobre a palha, como no sistema plantio direto. Já o fertilizante fosfatado mais utilizado é superfosfato simples, sendo uma excelente fonte, além de fósforo, também de cálcio e enxofre. E a maior parte do fertilizante potássico é comercializada como

cloreto de potássio. Destaca-se ainda o consumo de fosfato monoamônio (MAP) e sulfato de amônio.

A partir da década de noventa, houve grandes investimentos na indústria de fertilizantes, que modificou uma situação em que a maior parte das matérias primas para fabricação de fertilizantes era importada. As produções nacionais das principais matérias pri-

mas estão na Tabela 4. A situação em 1996, de acordo com Yamada e Lopes (1999), era de que cerca de 47% da oferta de fertilizantes era suprida pela indústria nacional, e o restante suprido pela importação.

Para os micronutrientes não existem dados estatísticos disponíveis, como existem para os macronutrientes. Segundo Yamada e Lopes (1999), a estimativa do consumo total de produtos como fonte de micronutrientes foi de 150 mil toneladas por ano, com as concentrações médias de: 4 a 8% de boro, 2 a 6% de cobre, 8 a 15% de manganês e, 12 a 15% de zinco. Em termos de quantidades seriam: 9 mil t de boro, 6 mil t de cobre, 17 mil toneladas de manganês e, 20 mil toneladas de zinco.

Em função da acidez excessiva dos solos, deveriam ser aplicadas cerca de 75 milhões de toneladas anuais de calcário. Atualmente, são aplicadas cerca de 20 milhões de toneladas de calcário por ano (Tabela 5). Embora a capacidade instalada para mineração e processamento seja atualmente de 50 milhões de toneladas anuais, a quantidade aplicada permaneceu praticamente constante nos últimos anos (Yamada e Lopes, 1999). Portanto, a cada ano, cerca de 60 milhões de toneladas de calcário deixam de ser aplicadas, resultando em menor eficiência dos fertilizantes, menor produtividade das lavouras, menor renda para os agricultores, maior perda da capacidade produtiva dos solos e, conseqüentemente, pressão sobre os recursos naturais. Na Tabela 6 estão apresentados os Estados com os maiores consumos de corretivos, os quais têm as maiores áreas agrícolas e a agricultura é mais tecnificada.

Provavelmente nas regiões onde não se esteja utilizando calcário, ou que este uso esteja abaixo do

recomendado, deve estar havendo uma menor eficiência na ação dos fertilizantes. Isso ocorre, pois existe uma interação positiva da calagem com eficiência da adubação. Por exemplo, para uma melhor eficiência da adubação fosfatada, é imprescindível que antes se faça correção do solo. O efeito da calagem na melhoria da eficiência de utilização de P pelas culturas está associado à precipitação de alumínio e ferro liberando fosfato para ser absorvido pelas plantas (Pavan e Oliveira, 1997).

EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES

Principais culturas

A produtividade média e os teores de macro e micronutrientes na parte colhida das principais culturas brasileiras (algodão, arroz, batata, cacau, cana-de-açúcar, café, laranja, eucalipto, feijão, mandioca, manga, melão, milho, soja, tomate e trigo) estão na Tabela 7. A partir destes dados, calculou-se as quantidades extraídas através da multiplicação da concentração de nutrientes na parte colhida pela respectiva produção brasileira. A partir do estabelecimento de produtividades ótimas, foi feita uma simulação das quantidades a extração de nutrientes para estas produtividades.

A Figura 3 mostra uma avaliação da quantidade de macronutrientes primários extraídos em 1999 pelas principais culturas brasileiras. Observa-se que o nitrogênio foi o nutriente mais extraído com 3.519 mil toneladas, seguido do potássio com 1.553 mil toneladas, equivalentes a 1.842 mil toneladas de K_2O , e do fósforo com 437 mil toneladas, equivalentes a 999,8 mil

Tabela 5. Produção e consumo aparente calcário no Brasil no período de 1991 a 2000.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	1.000 t									
Produção	10.525	15.624	19.390	20.457	12.245	14.763	17.432	16.285	15.768	19.305
Consumo aparente	10.525	15.408	19.659	20.435	12.262	15.617	17.059	16.136	15.304	19.812

Fontes ANDA/ABRACAL

Tabela 6. Consumo aparente de calcário nos principais Estados (1.000t).

Estado	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	1.000 t									
São Paulo	2.000	3.430	3.611	4.567	3.362	3.437	3.724	3.597	3.205	3.323
Mato Grosso	1.000	1.426	2.228	2.284	774	1.343	1.254	1.914	1.351	3.100
Minas Gerais	1.700	1.800	2.300	2.341	1.770	1.870	1.958	1.877	2.177	2.987
Goiás	800	1.762	1.940	2.330	1.180	2.350	1.644	1.591	1.990	2.550
Paraná	2.000	2.073	2.812	3.481	1.852	2.422	2.907	2.532	2.166	2.285
Rio Grande do Sul	1.175	2.818	3.696	3.122	1.392	1.799	2.319	2.103	1.871	2.004

Fontes ANDA/ABRACAL

Tabela 7. Produtividade atual e ótima e extração de nutrientes das principais culturas no Brasil.

Culturas	Produtividade		Macronutrientes					Micronutrientes						
	Atual	Ótima	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Mo
	t ou m ³		kg por t					g por t						
Algodão	2,13	3,0	23,0	4,0	16,0	8,4	3,7	7,7	33,0	10,0	243,0	14,6	12,3	150
Arroz	3,09	4,5	12,0	3,0	3,0	1,0	1,0	0,7	4,4	6,3	60,9	25,2	40,9	160
Batata	16,35	35,0	3,0	0,3	4,0	0,2	0,2	0,2	2,0	2,0	20,0	20,0	4,0	1.000
Cacau	0,30	1,5	32,0	6,0	48,0	1,0	2,0	1,0	12,0	16,0	80,0	28,0	47,0	40
Café	1,48	3,6	18,0	1,2	27,0	3,4	1,4	1,5	25,0	16,5	105,0	25,0	39,3	6
Cana	68,51	120,0	1,2	0,2	1,1	0,1	0,2	0,2	2,0	1,8	25,0	12,0	5,0	20
Citros	12,14	50,0	2,2	0,2	1,8	0,5	0,1	0,1	2,2	1,2	6,6	2,8	0,9	8
Eucalipto	47,30		1,1	0,1	0,7	1,6	0,4	0,5	3,7	2,3	10,0	20,0	1,1	29
Feijão	0,69	3,0	35,0	3,5	14,7	3,1	2,6	3,7	70,0	10,0		17,0	30,0	1.000
Mandioca	13,20	30,0	3,0	0,3	3,0	0,6	0,3	0,1	1,8	0,8	24,0	1,6	4,6	-
Manga	27,28	50,0	1,3	0,2	1,6	-	-	0,2	0,9	1,3	3,6	3,5	1,4	4,40
Melão	12,95	30,0	2,0	0,5	2,4	-	-	-	8,8	22,0	45,2	28,3	10,9	-
Milho	2,62	8,0	20,0	4,0	5,5	0,1	1,8	1,7	1,5	8,0	40,0	8,0	40,0	1.000
Soja	2,37	3,5	60,6	5,2	18,7	1,9	2,2	3,2	30,0	15,0	100,0	20,0	42,5	3.000
Tomate	50,15	70,0	1,8	1,0	2,1	0,1	0,2	0,3	5,0	10,0	25,0	24,0	25,0	12
Trigo	1,95	3,0	22,5	4,5	13,5	1,0	3,0	1,3	133,0	0,0	40,0	30,0	0,1	-

Fontes: Barbosa Filho (1987); Burton (1989); Castlane et al. (1991); Haag et al. (1991a), Haag et al. (1991b), IBGE (1996), Malavolta (1986); Malavolta e Violante Neto (1989); Malavolta et al. (1997); Oliveira e Thung (1988); Nakagawa (1991); Raij et al. (1997); Yamada e Lopes (1999).

toneladas de P_2O_5 . A relação $N:P_2O_5:K_2O$ foi de 3,52:1,00:1,84. Quanto aos macronutrientes secundários, as extrações de cálcio, magnésio e enxofre foram respectivamente, 320, 275 e 304 mil toneladas. Dos micronutrientes, o ferro foi o mais extraído pelas plantas em 1999 (15.875t), seguido pelo manganês (7.437t), zinco (5.295t), boro (2.778t), cobre (1.794t) e molibdênio (142t).

Em termos regionais, no Sul, em 1999, as culturas proporcionaram as maiores quantidades de extração de nutrientes primários: 1297 mil toneladas de N, 377 mil toneladas de P_2O_5 e 552 mil toneladas de K_2O , as quais respectivamente representaram 37, 38 e 30% do total do país. A segunda maior extração foi a da Região Sudeste com 792 mil toneladas de N; 238 mil toneladas de P_2O_5 e, 612 mil toneladas de K_2O , que representaram respectivamente 23, 24 e 33% do total. Em seguida as extrações da região Centro-Oeste (25, 23 e 20% do total de N, de P_2O_5 e K_2O), Nordeste (8, 9 e 10% do total de N, de P_2O_5 e K_2O) e, Norte (2, 3 e 3% do total de N, de P_2O_5 e K_2O). No entanto, há uma inversão das quantidades extraídas dos macronutrientes secundários (Ca, Mg e S) e dos micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), na qual a ordem decrescente de extração por região é: Sudeste, Sul, Centro-Oeste, Nordeste e Norte (Figura 3). A extração de molibdênio não foi apresentada na Figura por ser de ordem muito inferior aos demais valores. Porém a ordem de extração de molibdênio por região é: Sul, Centro-Oeste, Sudeste, Nordeste e Nor-

te, com respectivamente 40, 28, 18, 6 e 1% do total de 142 toneladas extraídas.

Pela estimativa da extração de nutrientes para produtividades ótimas das principais plantas cultivadas no Brasil, listadas na Tabela 07, constata-se que os valores comparados aos anteriores (Figura 3A) praticamente dobram, subindo para 6.810 mil toneladas de N, de 2.095 mil toneladas de P_2O_5 e 3.568 mil toneladas de K_2O (Figura 4).

Situação das pastagens

Dos quase 178 milhões de hectares sob pastagem, cerca de 100 milhões são de pastagens plantadas ou cerca de 13% da área total do País. As principais forrageiras utilizadas são: braquiária (*Brachiaria decumbens*, *B. humidicola* e *B. brizantha*), colônio (*Panicum maximum*), andropogom (*Andropogon gayanus*), jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) e pangola (*Digitaria decumbens*).

Na Região Amazônica, a maior parte das pastagens é estabelecida sem nenhuma adubação, estando a produtividade normalmente dependente dos resíduos das cinzas das queimadas. Nas outras regiões, geralmente a introdução ocorre após cultivo pioneiro de uma cultura anual, normalmente arroz ou outro cereal. Neste caso, a produtividade fica condicionada ao efeito residual do adubo químico aplicado para o cereal. Além dos problemas na implantação, outros também são observados no estabelecimento e condução destas pasta-

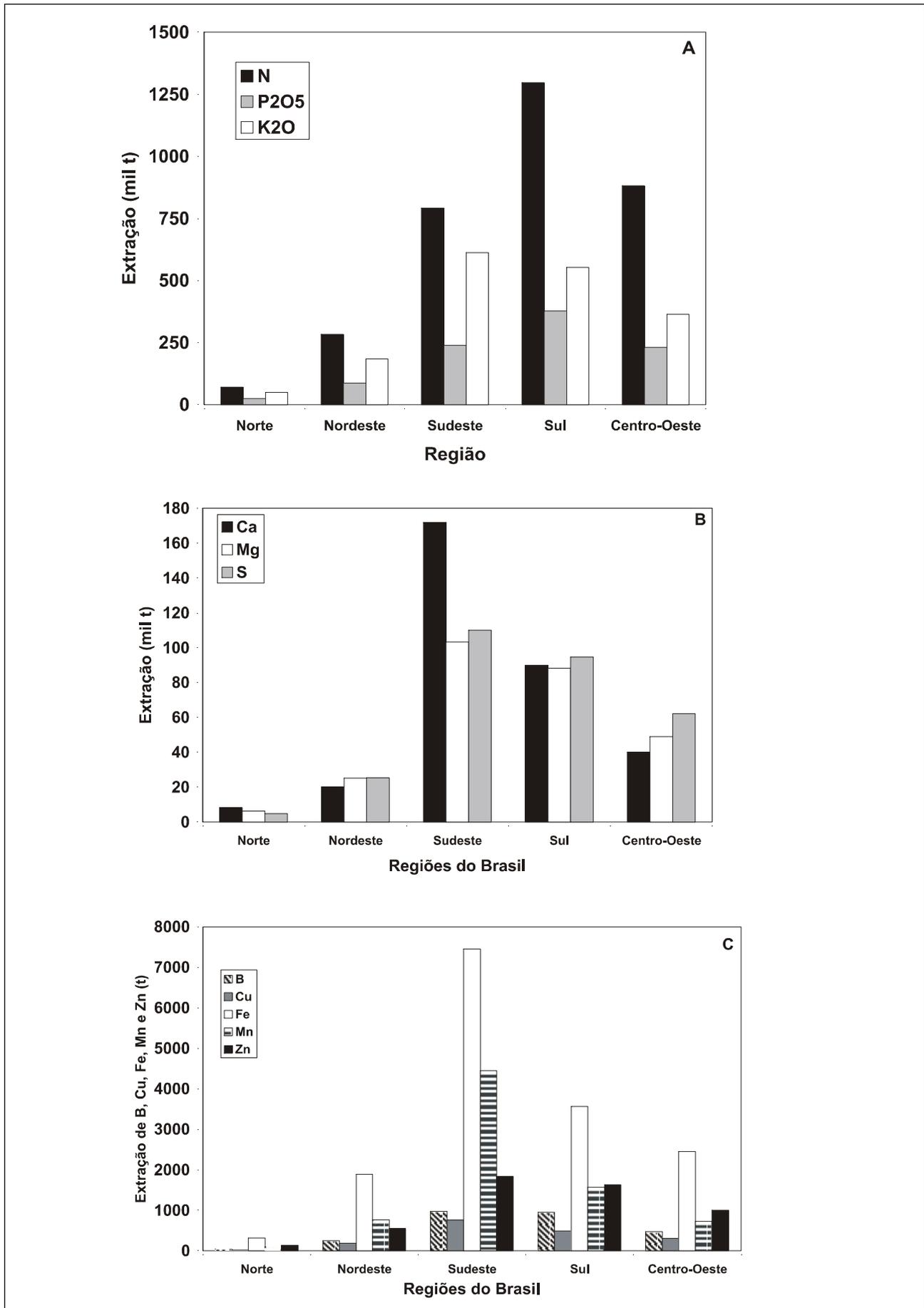


Figura 3. Extração de macronutrientes primários N, P e K (A), secundários Ca, Mg e S (B) e micronutrientes B, Cu, Fe, Mn e Zn (C).

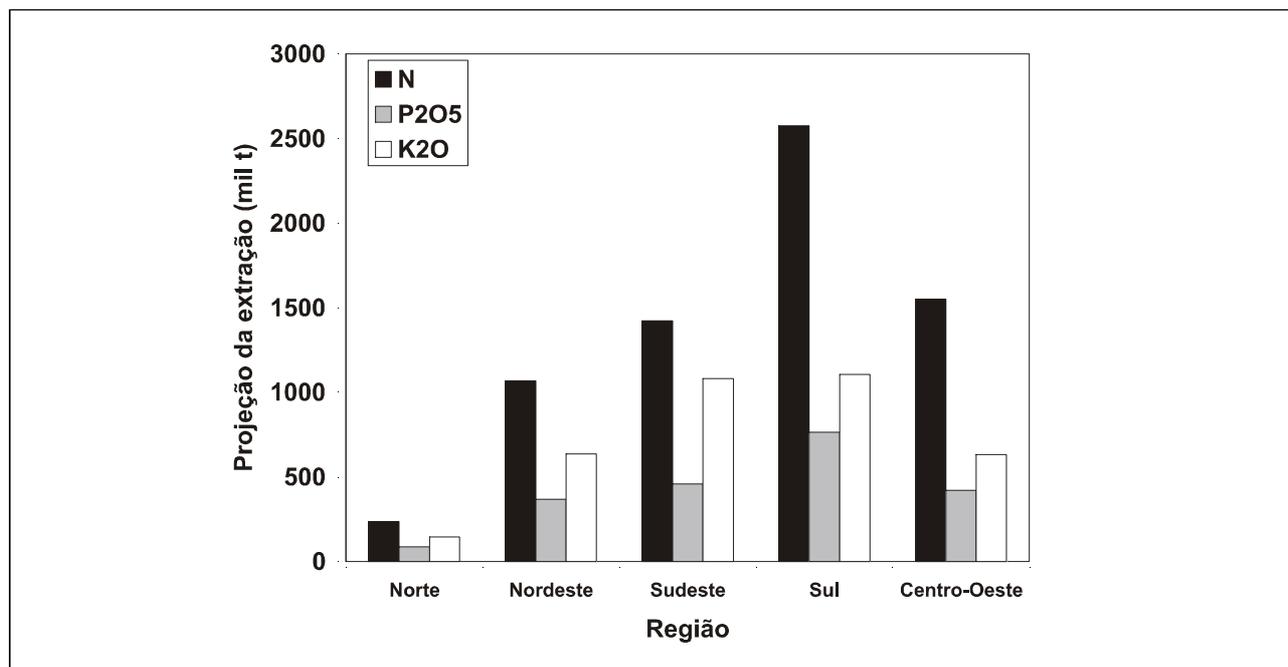


Figura 4. Projeção de extração dos macronutrientes N, P e K para produtividades ótimas.

gens, como o uso de solos exauridos por outras culturas ou pela erosão, a ausência da adubação (principalmente de fósforo e nitrogênio) e o sobrepastejo. Este modelo de exploração extrativista é uma das principais causas da degradação das pastagens e dos solos no Brasil. Nessas condições, as exigências das plantas forrageiras não são atendidas, a não ser após o curto período em que as cinzas das queimadas ou a decomposição da matéria orgânica, favorecida pelo preparo recente do solo, colocam em disponibilidade alguns nutrientes (Maraschin, 2000).

A remoção de nutrientes pelas forrageiras varia de 200 a 300kg de N, 30 a 60kg de P e 200 a 500kg de K por hectare. Já a remoção devida aos animais é muito baixa, pois numa pastagem de braquiária de alta produção com 2 a 4 cabeças por hectare, com ganho de peso diário de 1kg por ha, a exportação anual é de cerca de 9kg de N, 5kg de P₂O₅ e 0,84kg de K₂O por hectare (Monteiro e Werner, 1994).

No Brasil, a adubação da pastagem nativa ou plantada é insignificante gerando índices zootécnicos pífios. Entretanto, os efeitos benéficos da adubação são observados já no primeiro ano após a aplicação, enquanto a reposição das perdas pode melhorar em muito a eficiência da adubação, uma vez que a reciclagem é muito alta em pastagens produtivas e de qualidade.

Balanço de nutrientes

Os balanços para macronutrientes primários (N, P e K), representados pela diferença entre as entradas (*input*) e saídas (*output*) encontram-se na Tabela 8. Observa-se inicialmente que há um balanço negativo ape-

nas para o nutriente nitrogênio, sendo que para os demais a situação está praticamente equilibrada.

Refazendo o cálculo e descontando-se as 1.873 mil toneladas de nitrogênio extraídas pela cultura da soja, que no Brasil é cultivada sem fornecimento deste nutriente, ainda assim ter-se-ia um balanço negativo com um déficit 449 mil toneladas. Outro aspecto a se considerar seria a eficiência de utilização dos fertilizantes, que segundo dados da literatura são de 60% para o nitrogênio, 30% para o fósforo e de 70% para o potássio. Assim obter-se-ia uma nova realidade, mais voltada à situação prática do campo, com déficit de: 2.801 mil toneladas de nitrogênio (928 mil toneladas, descontando-se o nitrogênio da fixação biológica da soja); 488 mil toneladas de P₂O₅ e, 483 mil toneladas de K₂O.

Tabela 8. Balanço de macronutrientes primários na agricultura brasileira.

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Total
1.000 toneladas				
Entradas	1.197	1.708	1.941	4.847
Saídas	3.519	1.000	1.842	6.361
Balanço	-2.322	+ 708	+ 99	- 1.514

Adubações Balanceadas e Meio Ambiente

A prática da adubação é um dos principais fatores para a obtenção de produtividades ótimas e qualidade adequada dos produtos agrícolas. A questão reside na possibilidade de obter-se altas produtividades com o mínimo de impacto no meio ambiente.

Resultados experimentais têm mostrado que a resposta está no fornecimento balanceado de nutrientes pela adubação como ponto chave para a redução do impacto ambiental dos adubos. Dentre as ferramentas à disposição a análise de solo talvez seja a mais facilmente acessível. Esta técnica permite avaliar a disponibilidade de nutrientes às culturas, e é atualmente a principal prática utilizada para a recomendação das doses de corretivos e adubos. Outro fator são as boas práticas de manejo visando o uso eficiente de adubos, as quais incluem a forma de aplicação do adubo e época adequada de fornecimento.

Como já foi mostrado, uso de adubos minerais (fertilizantes químicos) e orgânicos (adubação verde de inverno e verão e esterco) no país é ainda baixa, por isso ainda não causam problemas ao ambiente (contaminação de águas subterrâneas, por exemplo) como os registrados em países como Holanda e Alemanha. Os itens a seguir servem para destacar como o manejo integrado de nutrientes deve nortear a estratégia de adubação das culturas na busca do aumento da produtividade como da proteção ao meio ambiente para as gerações futuras (Gruhn et al., 2000).

Fatores que interferem na eficiência do uso de nutrientes

Inicialmente a fertilidade do solo atendia às necessidades de produção na agricultura. Os esforços e conheci-

mentos eram basicamente dirigidos para os fatores que influenciam a disponibilidade dos elementos essenciais no solo, métodos de análise de solo e tecidos vegetais para avaliação dos teores destes elementos, as interações entre os nutrientes e o solo, ciclagem de nutrientes, métodos de aplicação de fertilizantes, e o desenvolvimento de técnicas de manejo de solo para otimização e o uso eficiente de nutrientes. Várias técnicas têm surgido nas últimas décadas com potencial para alterar significativamente o manejo da fertilidade do solo (Sims, 2000). Entendimentos mais profundos sobre os processos de difusão e fluxo de massa dos nutrientes na rizosfera foram obtidos nas décadas de 70 e 80 (Barber, 1984). No entanto, atualmente se sabe que cada planta tem uma influência diferenciada no ambiente radicular, indicando a necessidade de novos estudos sobre as interações do sistema solo-planta. A disponibilidade de nutrientes para as plantas é controlada por um complexo conjunto de fatores ligados às características dos vegetais e às condições do solo. Estes fatores foram listados por Baligar et al. (1990) e são apresentados no Box 2.

Práticas visando o uso eficiente

Na busca pela otimização da utilização de insumos é necessário que inicialmente se alcance o aperfeiçoamento da eficiência na utilização desses insumos. Por

Box 2. Mecanismos e processos que contribuem para o uso eficiente de nutriente nas plantas.

Fatores da Planta	
Efeitos ambientais	Fisiológicos
Intensidade e qualidade da luz	Estado nutricional
Temperatura e umidade	Idade e taxa de crescimento
Efeitos do pH do solo	Relação raiz/parte aérea
Geometria da raiz e pêlos radiculares	Taxa de absorção de água
Número e comprimento	Taxa de efluxo de nutriente
Taxa de crescimento	Taxa de transporte de nutriente
Raio da raiz	Distribuição do nutriente na planta
Rizosfera	Eficiência de utilização
Solubilidade do nutriente	Baixa necessidade funcional do nutriente
Exudados	
Associação microbiana	
Fatores do Solo	
Solução do solo	Difusão e Fluxo de massa
Equilíbrios iônicos	Umidade do solo
Solubilidade, precipitação	Tortuosidade
Íons competitivos	Propriedades iônicas
Íons orgânicos	Concentrações iônicas
pH	Outros fatores
Umidade e temperatura	Propriedades físico-químicas do solo

isso, a seguir são apresentados sucintamente, aspectos que devem ser considerados para a otimização do uso destes insumos.

Uso de genótipos mais eficientes

O emprego de cultivares eficientes na absorção e utilização de nutrientes é uma importante estratégia para a redução de custo da produção agrícola, por permitir menor uso de fertilizantes e corretivos na agricultura. A literatura indica que existe grande diferença entre os cultivares quanto à capacidade de absorção e utilização de nutrientes. Essas diferenças entre cultivares podem ser relacionadas ao processo fisiológico da planta ou às mudanças favoráveis para a cultivar na rizosfera (Fageria, 1992).

Calagem e gessagem

As raízes das plantas não se desenvolvem adequadamente em solos muito ácidos, contendo excesso de alumínio trocável ou teores muito baixos de cálcio. A origem da acidez pode ser decorrente da rocha de origem, remoção das bases (Ca, Mg, K), decomposição da matéria orgânica e absorção de nutrientes pelas plantas. A prática agrícola pode aumentar a acidificação através da aplicação de fertilizantes, especialmente os nitrogenados na forma amoniacal (sulfato de amônio). A calagem possibilita a correção da acidez nos solos, porém para que os resultados sejam adequados, aspectos como a qualidade do calcário, dose, época e modo de aplicação desse insumo devem ser considerados. Outros efeitos benéficos são o aumento da disponibilidade dos nutrientes (principalmente fósforo e molibdênio), aumento do volume de solo explorado pelas raízes, aumento da capacidade de troca de cátions, diminuição da fixação do fósforo, diminuição dos teores excessivos de alumínio tóxico e de manganês, favorecimento da fixação simbiótica do nitrogênio, e melhoria das propriedades físicas e biológicas do solo.

Os efeitos da calagem podem ficar restritos à camada arável ou superficial do solo e, o a camada imediatamente abaixo permanecendo ácido impossibilita o desenvolvimento do sistema radicular e limita a absorção de água e nutrientes, principalmente em períodos curtos de seca (veranicos). Existem vários resultados mostrando que a correção da acidez das camadas profundas favorece a produção das culturas, e essa correção pode ocorrer com a prática da gessagem (Raij, 1988).

Fertilizantes nitrogenados

Nos principais adubos nitrogenados comercializados no Brasil, o nitrogênio está presente nas formas amídi-

ca, nítrica e amoniacal, sendo todas solúveis em água. Quando aplicadas no solo, em curto período de tempo, a maior parte do N amídico ou amoniacal sofre oxidação e passa para a forma nítrica. Esta é a forma predominantemente absorvida pelas plantas, no entanto, pouco retida no complexo de troca do solo e sujeita a perdas por lixiviação. A eficiência da adubação nitrogenada é aumentada por meio de diversas práticas como: emprego de formas com disponibilidade controlada, parcelamento das doses recomendadas, localização adequada em relação às plantas e sementes, e calagem. Outra fonte de perda de N é através da volatilização de amônia e pode ocorrer em solos com pH acima de 7 quando os adubos contendo o N amoniacal aplicados na superfície. A uréia, aplicada em superfície está sujeita a perdas por volatilização, mesmo em solos ácidos. Estas perdas são potencializadas se a uréia for aplicada na superfície de solos úmidos, ou sobre resíduos de plantas, como no caso do plantio direto. Em solos de várzea, que permanecem inundados, não se deve utilizar adubos com N na forma nítrica, pois as condições redutoras do solo provocam rápida desnitrificação e formação de N_2 e N_2O (FAO, 1998; Isherwood 1998; Johnston, 2000).

Fertilizantes fosfatados

O fósforo é o nutriente que mais limita a produtividade na maioria dos solos tropicais. Com a prática das adubações os teores no solo tendem a se elevar, devido ao efeito residual. Considerando-se que os fosfatos são recursos naturais não renováveis, é imperioso utilizá-los de forma eficiente. Para que as culturas utilizem o fósforo aplicado é necessário que ocorra uma reação entre o fosfato e o solo, por isso a disponibilidade deste nutriente depende do equilíbrio e dinâmica no solo. A fração argila dos solos da região tropical é constituída predominantemente por caulinita e óxidos de Fe e Al, ou seja, minerais de carga variável, e que possuem um alto poder de fixação do fosfato. Como consequência, a maior parte do fósforo aplicada em solos argilosos é adsorvida de forma não-trocável, com poucas chances de retornar à solução do solo e de ser aproveitada pelas plantas. Desse modo, uma opção para melhorar a recuperação do fosfato aplicado via fertilizante é diminuir, antes de sua aplicação, a capacidade do solo em fixar o íon-fosfato. Os fatores que afetam a disponibilidade deste nutriente no solo são as quantidades adicionadas, o tempo e o volume de contato do fertilizante com o solo, o tipo e a quantidade de minerais presentes no solo, e o pH do solo. Por isso, a observação e controle destes fatores podem, efetivamente, reduzir a adsorção do fosfato aplicado. Assim, as práticas essenciais no manejo da adubação fosfatada e na economia deste nutriente são: análise de solo e

recomendação de doses adequadas, melhoria do volume de solo explorado pelas raízes através da calagem, redução do contato do fosfato com o solo através do uso de adubos na forma granulada, e a incorporação localizada nos sulco ou covas de plantio (FAO, 1998; Isherwood 1998; Novais e Smyth, 1999; Johnston, 2000).

Fertilizantes potássicos

A adubação potássica nos solos tropicais é de grande importância, em função da grande extração pela maioria das culturas, associada às baixas reservas do nutriente nestes solos muito intemperizados. Portanto, a sua restituição às plantas deve ser feita através da adubação potássica. O suprimento de potássio às plantas varia em função da forma em que se encontra no solo, da sua quantidade e do seu grau de disponibilidade nas diferentes formas, além dos fatores que interferem no deslocamento do nutriente na solução do solo até as raízes. O manejo da adubação, com relação às doses e modos de aplicação (sulcos, a lanço e parcelada) deve ser considerado, devido ao alto potencial de perdas por lixiviação que alguns solos podem apresentar. A aplicação de plantio normalmente é recomendada para ser realizada no sulco, porém também possa ser feita a lanço, antes do plantio, sendo que em solos com baixa fertilidade, aplicação no sulco pode ser mais viável economicamente. No entanto, a aplicação de altas doses de potássio no sulco de plantio deve ser evitada devido ao efeito salino pelo aumento do potencial osmótico e, em alguns casos, para diminuir as perdas por lixiviação, principalmente nos solos arenosos, com baixa capacidade de troca. Por isso, as doses elevadas devem ser reduzidas no plantio e o restante da aplicação pode ser feita em cobertura e a lanço, no período de maior exigência da cultura. Outro aspecto que deve ser considerado é o de que a adubação tardia em cobertura a lanço em solos argilosos pode não ser eficiente (FAO, 1998; Isherwood 1998; Johnston, 2000).

Fertilizantes com micronutrientes

Os micronutrientes desempenham papéis importantes no metabolismo vegetal, seja como constituintes de compostos ou como reguladores do funcionamento de sistemas enzimáticos. O suprimento adequado destes elementos é importante, para se evitarem diminuição da produção agrícola. No entanto, tem se observado no Brasil, um aumento da deficiência de micronutrientes. Isso tem ocorrido devido ao aumento de produtividade das culturas, à incorporação de solos de baixa fertilidade ao processo produtivo, ao uso crescente de calcário e adubos fosfatados, à incorporação inadequada de corretivos, e ao cultivo de variedades

com alto potencial de produção e alta demanda por micronutrientes. As quantidades destes nutrientes requeridos pelas plantas são muito pequenas, quando comparadas aos macronutrientes. As aplicações em excesso podem ser mais prejudiciais às plantas que a própria deficiência. Existem ainda grandes diferenças de comportamento de espécies vegetais, e até mesmo de variedades das mesmas espécies, com relação às exigências de micronutrientes. As formas de fornecimento dos micronutrientes podem ser através da aplicação no solo (no sulco ou covas, ou na superfície em culturas perenes), da adubação foliar, da fertirrigação ou das sementes. Nas aplicações localizadas as formas solúveis em água são mais prontamente disponíveis, já as fontes insolúveis devem ser utilizadas em área total (Lopes, 1999).

Alternativas aos fertilizantes minerais

Visando a redução ou substituição dos fertilizantes comerciais utilizados, existem diversos sistemas alternativos, os quais utilizam novas técnicas e conceitos de manejo de solo e da fertilidade. Estas incluem o uso de espécies leguminosas como adubo verde, rotação de culturas, uso de adubos orgânicos, e o uso de resíduos urbanos, industriais e agrícolas. Algumas destas alternativas são destacadas a seguir.

Adubação orgânica

O principal efeito que se deseja com a adubação orgânica é a melhoria das propriedades físicas e biológicas do solo. Com sua utilização, observa-se melhoria na porosidade, retenção de umidade e menor temperatura do solo (com cobertura morta na superfície ou 'mulch'). Estes produtos podem também ser utilizados como fontes de nutrientes, levando-se em conta que possuem em teores mais baixos e desbalanceados, necessitando, muitas vezes, de complementação com fertilizantes minerais. Alguns nutrientes, presentes nos adubos orgânicos, principalmente nitrogênio e fósforo, sofrem um processo de disponibilização mais lenta que os adubos minerais, no entanto este efeito é mais prolongado. De modo geral, pode-se considerar que no 1º ano de aplicação 50% do N, 70% do P_2O_5 e 100% do K_2O serão disponibilizados. Um aspecto importante que deve ser observado é o processo de cura (fermentação), o qual é essencial para a utilização de esterco e compostos. O objetivo é a obtenção de um produto homogêneo, estruturado, sem os odores desagradáveis característicos, isento de sementes viáveis de plantas daninhas, pragas e patógenos causadores de doenças. Além disso, este processo auxilia na obtenção de produtos com uma relação C/N ideal, boa mineralização

dos compostos orgânicos, e conseqüente liberação dos nutrientes através da mineralização (Ribeiro et al., 1999).

Comparações diretas entre adubo orgânico e mineral não são convenientes e geram mais polêmica que esclarecimento, pois os adubos orgânicos têm efeito de amplo espectro nas propriedades do solo, ou seja, efeitos físicos e biológicos, além do químico, sem considerar a diversidade de fontes e composições, modo, época e quantidade de aplicação e os efeitos específicos da matéria orgânica no solo. O maior interesse atual talvez esteja em estudos do uso associado destas duas fontes de nutrientes (Sanchez, 1997).

Um aspecto muito importante na adubação orgânica é a escolha do adubo. O melhor adubo orgânico é aquele que atenda às necessidades do solo e da planta cultivada. Este deve ser obtido em quantidades compatíveis com a área cultivada e a um custo compatível com a capacidade do agricultor e também com o benefício que ele irá trazer a longo prazo. É sempre importante consultar um agrônomo para auxiliar na escolha do adubo orgânico, pois é preciso saber das exigências da cultura, analisar o solo, analisar o adubo orgânico existente na região, verificar sua origem (adubos oriundos de resíduos industriais podem conter metais pesados em excesso como zinco e cádmio, que podem causar problemas à saúde pública) e verificar se ele atende às necessidades.

Fixação biológica do N_2 e associações com fungos micorrízicos

A substituição da parte de N mineral aplicado como adubo, pela fixação biológica do N_2 é uma opção para que se possa reduzir os custos de produção, através da redução da utilização deste insumo. A fixação biológica do N_2 é o processo pelo qual os organismos vivos conseguem aproveitar o N do ar, incorporando-o à biosfera. Em termos de importância agrícola, o principal sistema de fixação biológica do N_2 é a simbiose rizóbio-leguminosa. Na cultura da soja tem-se verificado os maiores sucessos e avanços na utilização desta simbiose, sendo que atualmente a principal fonte desse nutriente é a fixação biológica do N_2 . Esse processo supre totalmente as necessidades de N da planta, sendo inclusive desnecessárias as pequenas doses utilizadas nos plantios (Vargas e Suhel, 1982; Hungria et al., 1997). Entretanto, é necessário que a soja esteja bem nodulada e, para isso, as condições de solo mais apropriadas ao processo devem ser observadas, assim como a adequada inoculação das sementes (nos primeiros anos de cultivo).

A associação simbiótica de fungos micorrízicos com raízes de certas plantas é um fenômeno muito conhecido, no qual as hifas desses fungos se constitu-

em em uma extensão do sistema radicular das plantas. Isso resulta em maior superfície para absorção de nutrientes, principalmente aqueles que se movimentam no solo por difusão, por exemplo, P e Zn. A grande maioria das plantas que nodulam e fixam nitrogênio atmosférico, formam associações micorrízicas. Isto é de grande importância ecológica e agrônômica, pois a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio (FBN) dependem de um adequado balanço nutricional na planta hospedeira, especialmente do fósforo. Uma vez que plantas micorrizadas absorvem maiores quantidades de P do solo, a micorrização pode beneficiar o processo de FBN, e as plantas nodulada e micorrizadas estarão melhor adaptadas para enfrentar as situações de deficiências nutricionais existentes nos solos tropicais (Lopes e Siqueira, 1981).

A natureza dos efeitos do P na simbiose leguminosa-rizóbio-MVA não é bem entendida, mas evidências indicam que o efeito benéfico das MVA sobre FBN é conseqüente ao melhor estado nutricional da planta micorrizada (Bethlenfalvay e Yoder, 1981), pois a atividade da nitrogenase é dependente de ATP e fonte redutora, que são processos que possuem elevado requerimento de P.

Adubos verdes

Além de contribuir com a matéria orgânica do solo, as leguminosas utilizadas como adubos verdes poderiam ainda auxiliar no controle da erosão e propiciar reciclagem às camadas superficiais do solo de alguns nutrientes que são perdidos por lixiviação. Além da reciclagem estas espécies poderiam funcionar como fontes de nutrientes pouco disponíveis no solo como P e Mo. Há ainda evidências de que a mucuna e a *Crotalaria juncea* podem não apenas controlar os nematóides como também algumas plantas daninhas (Alvarenga et al., 1995). A grande vantagem da adubação é a possibilidade de ser conduzido em grandes áreas a um custo muito mais baixo que a adubação orgânica convencional.

Uso de resíduos

O uso de resíduos orgânicos de diferentes origens deve ser incentivado pelo fato de que, quando isso não acontece, aumentam as chances do meio ambiente ser prejudicado. Isso ocorre, por exemplo com o lodo de esgoto que é uma fonte de matéria orgânica e nutrientes, principalmente fósforo. Na maioria dos casos, o destino que se dá ao lodo no Brasil não é o agrícola, sendo comum o descarte desse insumo em rios e córregos, que se tornam altamente poluídos e desprovidos de peixes e outros organismos.

A aplicação de compostos de lixo urbano em solos cultivados proporciona aumentos na fito dispo-

nibilidade de P, K, Ca e Mg, elevação do pH, da CTC e redução da acidez potencial do solo. Entretanto, é comum encontrar na composição de compostos de lixo metais pesados, cujas concentrações variam conforme as regiões onde são gerados. Dessa forma, a utilização agrônômica desses resíduos, por anos sucessivos, traz preocupações quanto ao acúmulo desses elementos no solo e à possibilidade de sua absorção pelas plantas cultivadas. Os metais pesados, em solos tratados com compostos orgânicos de lodo de esgoto e lixo urbano, são mantidos em formas que não estão prontamente disponíveis às plantas, demonstrando que a capacidade de adsorção específica dos metais provenientes dos resíduos irá persistir pelo tempo que esses elementos persistirem no solo (Hoitnk e Keener, 1993).

Uso de rochas trituradas

Ultimamente vem crescendo o interesse pelo uso de rochas trituradas ou moídas como adubos fertilizantes para as culturas. A justificativa reside na combinação entre fatores químicos dos solos tropicais e econômicos. No Brasil, há uma vasta fonte de rochas ricas em potássio, fósforo, magnésio e cálcio que poderia reduzir a excessiva dependência nas fontes convencionais de adubos. Segundo algumas análises, os teores de fosfato (1.215 a 3.038mg kg^{-1}), cálcio e magnésio (40 a 73mg kg^{-1}) e potássio (158 a 308mg kg^{-1}) são adequados para serem utilizados como adubos de liberação lenta. Como exemplo destas rochas, pode-se citar as rochas ígneas como o basalto, andesito, fonolito, anortosito e sienito, assim como as rochas metamórficas ou sedimentares como a marga e o serpentinito. Entretanto, há a necessidade de mais pesquisas para avaliar o desempenho das rochas moídas, misturadas ou não com adubos minerais convencionais e adubos orgânicos, na agricultura tropical em solos ácidos (Leonardos, et al., 2000).

Novas tecnologias para o manejo integrado de nutrientes

Nas últimas décadas três tecnologias têm se destacado como sendo propostas de alteração no manejo do solo, e que podem alterar significativamente o uso de fertilizantes. Estas técnicas são o preparo conservacionista (incluindo o plantio direto), os sistemas agroflorestais, e as técnicas de agricultura de precisão.

O preparo conservacionista ou plantio direto representa a mais significativa alteração no manejo de solos da história moderna da agricultura. Esta técnica permite que se obtenha a produção agrícola com um mínimo risco de erosão. Foi inicialmente introduzida na América do Norte, e atualmente está sendo largamente utilizada, na América do Sul (especialmente no

Brasil), Austrália e em menores extensões na Europa (Bradford and Peterson, 2000). Aproximadamente 37% das terras agricultáveis nos Estados Unidos estão sendo manejadas com sistemas conservacionistas, que incluem o plantio direto e o cultivo mínimo (Lal et al., 1999). O sistema de plantio direto está tomando impulso em várias regiões do Brasil, como já foi apresentado anteriormente, ocupando cerca de 25% das terras com culturas anuais. Neste sistema, as características físicas, químicas e biológicas do solo são afetadas diferencialmente em relação ao plantio convencional, tais como retenção de umidade, oscilação térmica, distribuição do fósforo e matéria orgânica, teor de nitrogênio e distribuição de alguns organismos do solo (Muzzilli, 1983; Wiethölter, 2000; Machado e Silva, 2001). Há ainda evidências indicando que esta prática pode conduzir à economia da utilização de nutrientes, pois em solo sob plantio direto o maior acúmulo de matéria orgânica nos primeiros 10cm de solo, em relação ao solo sob aração ou gradagens freqüentes, permite que haja menor fixação de fósforo nos minerais do solo pois frações orgânicas como os ácidos húmicos podem bloquear os sítios de adsorção no mineral. Em sistemas de plantio direto, a inclusão da rotação de culturas com leguminosas resulta em economia no uso de adubo mineral nitrogenado na cultura subsequente. Atualmente abrange uma área de mais de 14 milhões de hectares no Brasil (Saturnino e Landers, 2001), que representa aproximadamente 30% da área plantada com lavouras temporárias. Foi estabelecido inicialmente na região Sul do país, e na década de 90, verificou-se um incremento de mais de 1,2 milhões de ha na região do Cerrado.

A utilização dos sistemas agroflorestais tiveram maior destaque a partir da década de 1980. Propõem a combinação de árvores de crescimento rápido com sistemas agrícolas, que incluem também a utilização de pastagem para alimentação animal (Mergen, 1986). Este sistema proporciona uma maior biodiversidade associada com a produção agrícola, além disso proporciona um aumento no sequestro de carbono (Schroeder, 1993).

As técnicas de agricultura de precisão, ou de manejo de sítios específicos, têm sido utilizadas com sucesso em alguns locais, como uma alternativa economicamente viável para a otimização do uso de nutrientes. Esta técnica se baseia na amostragem intensa das áreas de cultivo e uso de técnicas de geoestatística e de modelagem. Como propõem a quantificação, processamento e diagnósticos de vários fatores quer interferem na produção agrícola, representa atualmente um das alternativas de manejo mais científicas e avançada. A agricultura de precisão pode ser considerada como o início de uma revolução no manejo de recursos naturais baseada na tecnologia de informação. Mas esta técnica também pode ser vista como uma evolução,

uma vez que o manejo mais preciso dos solos e das culturas é possível através do uso de informações mais precisas e novas tecnologias. Com o uso destas técnicas a agricultura alcançou um novo patamar, no qual as etapas do processo produtivo são integradas e todo o processo controlado através de tecnologias de aquisição e processamento de informações (Heuvel, 1996; Bouma et al., 1999; Sims, 2000).

Efeitos benéficos das adubações balanceadas

Aumento da eficiência do uso do solo, nutrientes e água

Culturas nutridas de forma balanceada podem produzir mais com a mesma quantidade de água disponível. Estas plantas serão mais saudáveis e vigorosas, com maior produção de biomassa e, conseqüentemente, com uma melhor cobertura da superfície solo, levando à redução das perdas de solo e de nutriente por lixiviação e escoamento superficial. O processo foi esquematizado por Resek (1996) da seguinte maneira: melhor condição química > CTC > maior produção de biomassa vegetal > população microbiana > maior decomposição > cargas e subprodutos cimentantes > agregação do solo > maior armazenamento > de água > disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Preservação ambiental

O uso adequado de nutrientes através das adubações balanceadas pode aumentar significativamente o potencial de seqüestro de carbono, uma vez que culturas mais produtivas tendem a aumentar os níveis de carbono orgânico dos solos e seqüestro do CO₂ atmosférico (Stewart, 2002).

O uso de adubações balanceadas também pode reduzir o potencial de desflorestamento e preservação ambiental. De acordo com Lopes e Guilherme (1991, 2001), mostraram que com a utilização adequada de fertilizantes e corretivos é possível verticalizar a produção agrícola por área (produtividade), evitando dessa forma que haja a necessidade de incorporação de novas áreas para aumentar o volume de produção. Esta redução da área necessária para agricultura, propiciaria mais áreas para lazer e preservação ambiental. Um exemplo desta troca é apresentado na Tabela 13, adaptada de Sanchez et al. (1990) que avaliaram diversas opções de manejo para Yurimaguas no Peru. Para cada hectare adaptado às tecnologias de manejo do solo visando uma agricultura sustentável, 5 a 10 hectares por ano de florestas tropicais são salvas do cultivo convencional, em função da alta produtividade que pode ser alcançada pelas tecnologias alternativas.

Tabela 9. Áreas que podem ser salvas do desflorestamento por várias opções de manejo, estimada para Yurimaguas no Peru.

1 ha em opção de manejo sustentável	ha salvos do desflorestamento anualmente
Arroz irrigado	11,0
Pastagens de leguminosas e gramíneas	10,5
Culturas com alto uso de insumos	8,8
Culturas com baixo uso de insumos	4,6

Fonte: Sanchez et al. (1990).

Diminuição do efeito estufa

Em 1997, na cidade de Quioto, Japão, muitos países assinaram um acordo de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE – ex. dióxido de carbono, metano e óxido nitroso). Embora o Brasil não tenha que reduzir suas emissões como os países industrializados (ex. EUA, Japão, França e Alemanha), hoje em dia, a agricultura moderna sustentável deve considerar a proteção da atmosfera, além das águas superficiais e subterrâneas. Neste início de século, a tendência de aquecimento da Terra tem sido cada vez mais evidente: os últimos anos foram os mais quentes jamais registrados anteriormente e, segundo estimativas, haverá aumento na incidência de temporais intercalados por anos de seca prolongada. Em modelos de simulação da agricultura mundial, os impactos da mudança climática na produção agropecuária no Brasil estão entre os mais severos de todas as regiões. Os teores de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) na atmosfera vêm aumentando de forma consistente. Ao contrário do vapor d'água, que é o gás mais eficaz na manutenção do aquecimento global, pequenas alterações na concentração de CO₂, CH₄ e N₂O podem causar impacto significativo na mudança climática. A contribuição da agricultura para o aumento na emissão de gases de efeito estufa se dá através da decomposição da matéria orgânica do solo (emissão de CO₂), de ruminantes e arroz de terras baixas (emissão de CH₄) e durante o processo de nitrificação e desnitrificação no solo (emissão de N₂O). Entretanto, o papel dos solos agrícolas em atuarem como redutores na emissão de GEE tem sido comprovado também, particularmente para sistemas de plantio direto. Este sistema promove o aumento da cobertura da superfície do solo pela palha residual de uma planta resultando na proteção do solo contra a erosão e, assim, acumulando paulatinamente carbono no solo. O sistema passa a atuar mais como dreno, que como emissor de carbono para a atmosfera.

Referências Bibliográficas

- BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; FAGERIA, N. K. Soil-plant interaction on nutrient use efficiency in plants: an overview. In: BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R. (ed.) **Crops as enhancers of nutrient use**. Washington: National Academic, 1990. p.351-73.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**. New York, NY: Wiley. 1984. 1v.
- BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz** (sequeiro e irrigado). Piracicaba: Potafos, 1987. 120 p. (POTAFOS. Boletim técnico, 9)
- BETHLENFALVAY, G. J.; YODER, F. The Glycine-Glomus-Rhizobium symbiosis: I. Phosphorus effect on nitrogen fixation and mycorrhizal infection. **Physiologia Plantarum**, v.52, p.141-145, 1981.
- BOUMA, J.; STOOBVOGEL J.; VAN ALPHEN B.J.; BOOLTINK H. W. G. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. **Soil Science American Journal**, Madison, v.63, p.1763-1768, 1999.
- BURTON, W. G. **The potato**. 3.ed. Harlow, Longman Scientific & Technical, 1989. 1v.
- CASTELANE, P. D.; SOUZA, A. F.; MESQUITA FILHO, M. V. Culturas olerícolas. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (ed.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos, 1991. p. 549-584.
- FAO. **Fertilizer use by crop**. 4.ed. Rome: FAO/IFA/IFDC. 1999. 52 p
- FAO. **Guide to efficient plant nutrition management**. Rome: FAO. 1998. 19 p.
- GRUHN, P.; GOLETTI, F.; YUDELMAN, M. **Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture**: current issues and future challenges. 2020 Vision for Food, Agriculture, and the Environment. International Food Policy Research Institute – IFPRI. Brief 67. 2000. 2 p.
- HAAG, H. P.; DECHEN, A. R.; CARMELLO, Q. A. C. Culturas estimulantes. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba, Potafos. 1991a. p. 501-548.
- HAAG, H. P.; DECHEN, A. R.; CARMELLO, Q. A. C. Essências florestais. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba, Potafos. 1991b. p. 683-734.
- HEUVEL, R. M. V. The promise of precision agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 38-40, 1996.
- HOITINIK, H. A.; KEENER, H. M. **Science and engineering of composting**: design, environmental, microbiological and utilization aspects. Washington, Renaissance Publications, 1993.
- HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T.; CAMPO, R. J.; GALERANI, P. R. **Adubação nitrogenada na soja?** Londrina, PR: Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Soja. 1997. 4 p. (Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. Comunicado Técnico, 57).
- IBGE. **Anuário estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE. 1999. 1 v.
- IBGE. **Censo Agropecuário 1995-1996**. Rio de Janeiro, IBGE. 1996. 1 v.
- ISHERWOOD, K. F. **Fertilizer use and the environment**. Paris: IFA:UNEP. 1998. 51 p.
- JOHNSTON, A. E. **The efficient use of plant nutrients in agriculture**. Paris, IFA, 2000. 14 p.
- LAL, R.; FOLLET, R. F.; KIMBLE, J. M.; COLE, V. R. Managing U.S. cropland to sequester carbon in soil. **Journal of Soil Water Conservation**, v. 54, p. 374-381, 1999.
- LEONARDOS, O. H., THEODORO, S. H., ASSAD, M. L. Remineralization for sustainable agriculture: a tropical perspective from a Brazilian viewpoint. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 56, n. 1, p. 3-9, 2000.
- LOPES, A. S. **Micronutrientes**: filosofias de aplicação e eficiência agrônoma. São Paulo: ANDA, 1999. 58 p. (Boletim Técnico, 8).
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Preservação ambiental e produção de alimentos**. São Paulo: ANDA. 1991. 14 p.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Vocaçao da terra**. São Paulo: ANDA. 2001. 23 p.
- LOPES, E. S.; SIQUEIRA, J. O. Vesicular-arbuscular mycorrhizas, their potential in phosphate nutrition in tropical regions. In: RUSSELL, R.S.; IGUE, K.; MEHTA, Y.R. (ed.) **The soil/root system in relation to Brazilian agricultures**. Londrina: IAPAR, 1981. p. 225-242.
- MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 61, p. 119-130, 2001.
- MALAVOLTA, E. Fertilizantes, corretivos e produtividade – mitos e fatos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais... SBSCS**, 1992. p. 89-153.
- MALAVOLTA, E. Nutrição mineral e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (eds) **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos. 1986. p. 165-274.
- MALAVOLTA, E.; VIOLANTE NETO, A. **Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação de citros**. Piracicaba: Potafos. 1989. 1 v.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas** – princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: Potafos. 1997. 319 p.
- MARASCHIN, G. E. Relembrando o passado, entendendo o presente e planejando o futuro – uma herança em forrageiras e um legado em pastagem. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA. 37. **Anais...** 2000. Disponível: SBZ site. HYPERLINK URL:<http://www.sbz.org.br> Consultado em 08 mar 2002.
- MERGEN, F. Agroforestry – an overview and recommendations for possible improvements. **Tropical Agriculture**, v. 63, n. 1, p. 6-9, 1986.
- MONTEIRO, F.A., WERNER, J.C. Reciclagem de nutrientes em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS. 11. **Anais...** Piracicaba, SP. Piracicaba, SP: FEALQ. 1994. 325 p.
- MUZILLI, O. Influencia do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p. 95-102, 1983.
- NAKAGAWA, J. Fruteiras. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos. 1991. p. 585-623.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa -UFV, Departamento de Solos - DPS, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA, I. P.; THUNG, M. D. T. Nutrição mineral. In: ZIMMERMANN, J. J. O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (eds). **Cultura do feijoeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos. 1988. p. 175-212.
- PAVAN, M. A., OLIVEIRA, E. L. **Manejo da acidez do solo**. Londrina, PR: IAPAR, 1995. 86 p. (Circular, n. 95)
- 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, SP: IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, n. 100)
- RAIJ, B. van. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: ANDA. 1988. 88 p.

- RESEK, D. V. S. Manejo de solos e sustentabilidade dos sistemas agrossilvipastoris na região dos Cerrados. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, I; SIMPÓSIO SOBRE CERRADOS, 8. 1996. Brasília, DF. **Proceedings=Anais...** Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p. 81-89.
- RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ V., V. H. (eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. 359 p.
- SANCHEZ, P. A. Changing tropical soil fertility paradigms: from Brazil to Africa and back. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAEFFERT, R. E.; FAGERIA, N. K.; ROSOLEM, C. A.; CANTARELLA, H. (eds.) **Plant-soil interactions at low pH.** Campinas, SP: Brazilian Soil Science Society, 1997. p.19-28.
- SANCHEZ, P. A.; PALM, C. A.; SMYTH, T. J. Approaches to mitigate tropical deforestation by sustainable soil management practices. In: SCHARPENSEEL, H. W.; SCHOMAKER, M.; AYOUB, A. **Soils on a warmer earth.** Amsterdam: Elsevier, 1990. p. 211-220.
- SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, New York, v. 34, p. 280-407, 1981.
- SCHROEDER, P. Agroforestry systems: integrated land use to store and conserve carbon. **Climate Research**, v. 3, n. 1, p. 53-60, 1993.
- SIMS, J. T. Soil fertility evolution. In: SUMNER, M. e. (ed.) **Handbook of soil science.** Boca Raton: CRC Press. 2000. p. D113-D153.
- STEWART, M. **Balanced fertilization and the environment.** Disponível: Potafos site. HYPERLINK URL:<http://www.potafos.org/ppiweb/ppibase.nsf> Consultado em 26 fev. 2002.
- VARGAS, M. A. T.; SUHET, A. R. Adubação nitrogenada, inoculação e épocas de calagem para a soja em solo sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 8, p. 1127-1132, 1982.
- WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS, 25.; REUNIAO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8.; SIMPOSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6.; REUNIAO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000. Santa Maria, RS. **Fertbio 2000: biodinâmica do solo.** Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. 35 p. 1 CD ROM
- YAMADA, T., LOPES, A. S. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. In: SIQUEIRA, J. O., MOREIRA, F. M. S., LOPES, A. S., GUILHERME, L. R. G., FAQUIN, V., FURTINI NETO, A. E., CARVALHO, J. G. (Ed.) **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas.** Viçosa: SBCS; Lavras: UFLA-DCS. 1999. p. 143-161.