

FERNANDO JOSÉ FREIRE

**SISTEMA PARA CÁLCULO DO BALANÇO NUTRICIONAL
E RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES
PARA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

FERNANDO JOSÉ FREIRE

**SISTEMA PARA CÁLCULO DO BALANÇO NUTRICIONAL
E RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES
PARA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 8 de junho de 2001.

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Conselheiro)

Prof. Nairam Félix de Barros
(Conselheiro)

Prof. Gaspar Henrique Korndörfer

Prof. Roberto de Aquino Leite

Prof. Víctor Hugo Alvarez V.
(Orientador)

A minha esposa, *Betânia*,

A meus filhos, *Pedro e João Filipe*,

A meus pais, *José e Nacir*,

A meus avós, *Pedro, Salvino, Azineta e Eutália (in memorium)*.

AGRADECIMENTO

À Deus, por tudo, sempre.

Ao Prof. Víctor Hugo Alvarez V. pela orientação.

Aos Profs. Roberto Ferreira de Novais e Nairam Félix de Barros, conselheiros desse trabalho.

A minha esposa, companheira de todos os momentos da minha vida.

A meus filhos pela harmonia de viver com alegria e serem nossos verdadeiros companheiros nos mais distantes lugares que fomos.

Ao Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, exemplo de dignidade e respeito pela Ciência do Solo.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco pela grata oportunidade de realizar esse trabalho.

Ao Departamento de Agronomia da UFRPE, especificamente a Área de Solos, abrigo de luta e afirmação da Ciência do Solo no Nordeste do Brasil.

A todos que, de algum modo, estiveram junto comigo em tudo que já realizei na vida.

BIOGRAFIA

FERNANDO JOSÉ FREIRE, filho de José de Araújo Freire e Nacir de Oliveira Freire, nasceu em Arcoverde, estado de Pernambuco, em 15 de Fevereiro de 1963.

Em março de 1981, iniciou o Curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural de Pernambuco e diplomou-se em fevereiro de 1985.

Em maio de 1985, foi contratado pela Prefeitura Municipal do Recife para atuar como responsável técnico pelo plantio e condução da arborização urbana da cidade do Recife.

Em março de 1987, iniciou o Curso de Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo na Universidade Federal Rural de Pernambuco, concluindo-o em março de 1991.

Em fevereiro de 1996, prestou concurso e foi contratado pela Universidade Federal Rural de Pernambuco como Prof. Assistente do Departamento de Agronomia na área de Química e fertilidade do Solo.

Em março de 1998, iniciou o Curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa (MG).

ÍNDICE

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Cana-de-açúcar: origem, solos e Sistema produtivo	4
2.2. Efeito da nutrição mineral na cultura da cana-de-açúcar ...	8
2.2.1. Teor e extração de nutrientes pela cana -de-açúcar	9
2.2.2. Nitrogênio	14
2.2.3. Potássio	17
2.2.4. Fósforo	18
2.2.5. Cálcio e magnésio	21
2.2.6. Enxofre	23
2.2.7. Micronutrientes	23
2.3. Recomendações de adubação e estado nutricional da cultura da cana-de-açúcar no Brasil	24

3. ESTRUTURA DO SISTEMA	27
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	32
4.1. Desenvolvimento do Sistema para cálcio e magnésio	33
4.1.1. Estimativa dos CUB de cálcio e de magnésio	33
4.1.2. Demanda de cálcio e de magnésio	36
4.1.3. Taxa de recuperação de cálcio e de magnésio pela planta	43
4.1.4. Disponibilidade de cálcio e de magnésio	44
4.1.5. Calagem	46
4.1.5.1 Método da saturação por bases	46
4.1.5.2. Método da neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis	47
4.1.5.3. Método da neutralização do alumínio trocável ou da elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis	48
4.1.5.4. Método proposto pelo SBNR-C	48
4.1.5.5. Simulação da recomendação de calcário pelo SBNR-C	52
4.2. Desenvolvimento do Sistema para potássio	62
4.2.1. Estimativa do CUB de potássio	62
4.2.2. Demanda de potássio	63
4.2.3. Taxa de recuperação de potássio pela planta	67
4.2.4. Disponibilidade de potássio	67
4.2.5. Adubação potássica	68
4.3. Desenvolvimento do Sistema para fósforo, enxofre e zinco	72
4.3.1. Estimativa dos CUB de fósforo, de enxofre e de zinco	72
4.3.2. Demanda de fósforo, de enxofre e de zinco	80
4.3.3. Taxa de recuperação de fósforo, de enxofre e de zinco pela planta	83
4.3.4. Disponibilidade de fósforo, de enxofre e de zinco	86
4.3.5. Efeito residual de P	89
4.3.6. Adubação fosfatada	91
4.3.7. Adubação com enxofre e com zinco	102
4.4. Desenvolvimento do Sistema para nitrogênio	103
4.4.1. Estimativa do CUB de nitrogênio	103
4.4.2. Demanda de nitrogênio	105
4.4.3. Taxa de recuperação de nitrogênio pela planta	107

4.4.4. Disponibilidade de nitrogênio	108
4.4.5. Adubação nitrogenada	111
4.5. Desenvolvimento do Sistema para micronutrientes	116
4.5.1. Estimativa dos CUB de boro, de cobre, de ferro e de manganês	116
4.5.2. Demanda de boro, de cobre, de ferro e de manganês ...	117
4.5.3. Taxa de recuperação de boro e de cobre pela planta ...	118
4.5.4. Disponibilidade de boro e de cobre.....	118
4.6. Sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar	119
4.6.1. Estimativa das doses que viabilizem o cultivo sustentável	120
5. RESUMO E CONCLUSÕES	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

RESUMO

FREIRE, Fernando José, DS, Universidade Federal de Viçosa, junho de 2001.
Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar. Orientador: Víctor Hugo Alvarez V. Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Nairam Félix de Barros.

As recomendações de adubação praticadas no País baseiam-se, essencialmente, em curvas de resposta, em que nutrientes são aplicados em doses crescentes e seus efeitos observados no incremento da produção. Recomendações de caráter mais preditivo seriam de aplicação mais generalizada. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar (SBNR-C), tendo como base a demanda nutricional para uma determinada produtividade de colmos. No cálculo da demanda para formação de toda a matéria seca da planta é necessária a informação dessa produtividade e, no caso do P, S e Zn, é necessária, também, a informação de uma medida do poder tampão do solo. Com isso, o SBNR-C estima os níveis críticos de produção e com os resultados da análise de nutrientes calcula o balanço nutricional, que indica a necessidade ou não de correção do solo e aplicação de fertilizantes. A dose a ser recomendada do nutriente deverá ser acrescida de doses suplementares, calculadas para não permitir a exportação e a

gradual exaustão do solo, viabilizando o cultivo sustentável. O modelo proposto para recomendar calcário mostrou-se consistente por recomendar de forma variável para qualquer produtividade, permitindo que a recomendação apresente um inter-relacionamento mais amplo com o sistema solo-planta e torne-se mais universalizado, além de estimar o pH final obtido para qualquer que seja a recomendação. A estimativa dos níveis críticos e as doses recomendáveis de K em ressecas mostraram-se coerentes com as doses recomendadas em cana planta e soca, diferenciando-se, principalmente, deste último cultivo, o que não prevê nenhuma tabela de recomendação de fertilizantes para cana-de-açúcar no País. A estimativa do efeito residual de P em soca e resseca mostrou-se consistente, podendo-se inferir que quanto menor o tempo de cultivo da cana planta, por exemplo, com o uso de variedades mais precoces, maior será o efeito residual de P em socas. O ajuste de um modelo preditivo para quantificar o N potencialmente mineralizável em cana planta, soca e resseca, utilizando os teores de matéria orgânica e a argila do solo, permitiu estimar o suprimento deste nutriente e, de forma consistente, recomendar N. A simulação da recomendação para Zn, B e Cu mostraram níveis críticos compatíveis com resultados experimentais encontrados na literatura. As poucas informações existentes para Fe e Mn não permitiram sua completa modelagem. Versões futuras do SBNR-C poderão dispor destas informações. O SBNR-C representa uma ferramenta eficaz na recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cana-de-açúcar. Sistema que deve ser continuamente aperfeiçoado à medida que novas informações de pesquisas sobre o manejo nutricional da cultura forem surgindo. Em sua maioria, o Sistema foi resultado de trabalhos realizados com cana-de-açúcar no Brasil, porém uma parte deles e suas estimativas foram oriundos dos conhecimentos práticos vigentes. Mais do que uma hipótese, o Sistema representa um projeto a ser confirmado e retroalimentado com novas pesquisas.

ABSTRACT

FREIRE, Fernando José, DS, Universidade Federal de Viçosa, June, 2001.
System to estimate the nutritional balance and fertilizers recommendation for sugar cane plants. Adviser: Víctor Hugo Alvarez V.
Committee members: Roberto Ferreira de Novais and Nairam Félix de Barros.

Currently fertilizers recommendation for the sugar cane culture in Brazil are based on growth curves, obtained from the relationship between fertilizer rates and yield increment. Predictive recommendation systems are desirable and of wider application. This work was carried out aiming to structure and develop a System to estimate the nutritional balance and recommend lime and fertilizers to sugar cane plants (SBNR-C) based on the nutritional demand (ND) and expected yield (EY). The input information required by the System is the expected yield and the nutrient use efficiency (NUE). The nutrient demand is estimated dividing EY by NUE. Specifically for P, S and Zn, besides the EY and NUE values, the System requires information related to soil's buffer capacity. This way, the System estimates the critical level for each nutrient for the EY and compares this value with the nutrient availability in the soil, indicating the need or not for lime and, or, fertilizer application. The recommended fertilizer rate may be multiplied by a factor that increases the amount of nutrient added in order to avoid soil

nutrient depletion and to assure yield sustainability. The proposed model for lime recommendation showed itself consistent for being possible variable recommendations depending on the EY, allowing a wider inter-relationship with the plant-soil system and estimating the final pH value for any lime dose. The estimate of the critical level and K doses for **ressocas** were coherent with the nutrient recommendation for sugar cane plants and **socas**, specially for the last cultivation since it's not contemplated in any recommendation tables in Brazil. The estimate of the residual effect of P in **soca** and **ressoca** was consistent, allowing to infer that shorter cultivation periods, for example with early cultivars, results in more pronounced residual effects. The adjustment of a predictive model for quantification of the mineralizable N in Sugar cane plants, **soca** and **ressoca**, using organic matter and clay content in the soil allowed the th estimation of this nutrient's necessity. The simulations for Zn, B and Cu resulted in compatible critical values when compared with critical levels in the literature. The little information existing for Fe and Mn didn't allow the complete modeling for these elements. Future versions of the SBNR-C could make this information available. The SBNR-C represents na efficient tool for the recommendation of lime and fertilizers for sugar cane plants. Nevertheless, the system needs to be continuously updated in order to keep up with new research results. The information that made this work possible are mostly form researches carried out in Brazil.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar, uma das primeiras atividades de importância econômica no Brasil, compõe o mais antigo setor agroindustrial do País e ocupa uma posição de destaque na economia nacional. Sua produção é destinada, principalmente, à indústria do açúcar e do álcool e, dentre os mais diversos produtos agrícolas destinados à industrialização, a cana-de-açúcar destaca-se pela tradição, pela relevância sócio-econômica, pela sua função energética e pela distribuição geográfica por todo o País.

Associada ao processo de formação e consolidação do Brasil, a agroindústria da cana-de-açúcar foi expandindo-se gradativamente e, ao longo da história econômica do País, passou por diversas fases em que se alternaram períodos de prosperidade e de crise, quase sempre determinados pela conjuntura econômica mundial (ANDRADE, 1994).

As duas crises internacionais do petróleo ocorridas em 1973 e 1979, bem como as medidas adotadas pelo governo brasileiro na superação dessas crises, como o programa PROÁLCOOL, refletiram significativamente na agroindústria da cana-de-açúcar.

Analisando-se o comportamento da produção de cana-de-açúcar no Brasil, durante o período 1970 a 1996, pode-se notar o impacto positivo que o programa PROÁLCOOL proporcionou à expansão dessa cultura. Assim, a produção e a produtividade da cana-de-açúcar e do álcool

cresceram, de forma acentuada, no período posterior à implementação do PROÁLCOOL, em 1975. A expansão da produção e os ganhos de produtividade foram bastante expressivos de 1975 a 1985, e apresentaram tendência de estabilização no período de 1985 a 1996.

No momento, o Brasil é o primeiro produtor de cana-de-açúcar e de álcool e, com base nos dados da safra 1996/97, ocupava, também, a posição de maior exportador de açúcar. O País responde por, aproximadamente, 27 % da produção global de cana, por 57 % do álcool e por 11 % do açúcar produzido no mundo (VIEIRA, 1999). Nesse contexto, esse autor destaca que a diversificação da agroindústria da cana-de-açúcar e o aumento da eficiência, alcançados nos últimos anos, são, em grande parte, atribuídos à implementação do PROÁLCOOL.

De 1970 a 1996, o rendimento médio da cana-de-açúcar aumentou 53 %, passando de $46,2 \text{ t ha}^{-1}$ para $70,5 \text{ t ha}^{-1}$. Dados do triênio 1996/1998 mostram que São Paulo atingiu produtividade média de $78,3 \text{ t ha}^{-1}$ (GONÇALVES & VEIGA FILHO, 1998). Para esses resultados contribuíram, substancialmente, as pesquisas realizadas pelo PLANALSUCAR (Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar), pela COPERSUCAR (Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo) e pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas).

As novas variedades e as novas técnicas de manejo do solo e da água, aliadas aos estudos de fertilidade do solo e nutrição de plantas foram algumas das tecnologias responsáveis pelo crescimento da produtividade. Nesse sentido, era mais do que necessário o desenvolvimento de pesquisas que apontassem a existência de lacunas e, ao mesmo tempo, levassem à redução de custos, tornando o uso de fertilizantes e corretivos mais eficiente.

As recomendações de adubação praticadas no País baseiam-se, essencialmente, em curvas de resposta, em que nutrientes são aplicados em doses crescentes e seus efeitos observados no incremento da produção, sendo tais calibrações regionalizadas e para determinados tipos de solo. Tais métodos de pesquisa geram tabelas de recomendação que, embora com razoável acerto em suas indicações, apresentam evidente empirismo ou subjetivismo em sua constituição. Assim, uma simples

comparação entre tabelas de diferentes estados brasileiros mostram diferentes recomendações para condições semelhantes de solo e de cultivo, e a mesma recomendação para diferentes solos.

Particularmente, no caso da cultura da cana-de-açúcar, em que os fertilizantes são responsáveis por 20 a 25 % do custo de produção, as tabelas apresentam recomendações muito variadas, tanto para cana planta como para cana soca, o que coloca a cana-de-açúcar como consumidora de 16,3 % de fertilizantes no Brasil (RAMOS, 1999).

É premente o desenvolvimento de um modelo menos empírico que permita diferenciar a necessidade da cultura, de acordo com a produtividade desejada e o potencial de suprimento do solo, de tal forma que a adição de nutrientes seja oriunda fundamentalmente do balanço nutricional. O conhecimento desse balanço permitirá ajustes para a obtenção de recomendações mais adequadas, podendo, inclusive, chegar a uma redução na quantidade de fertilizantes a utilizar. O ajuste de modelos mecanísticos de abrangência mais generalizada pode tornar-se uma ferramenta eficaz para recomendações criteriosas de fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar no Brasil.

Assim, esse trabalho tem como objetivos: sistematizar informações de características físicas, químicas e físico-químicas dos principais solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil para predizer seus efeitos no balanço nutricional e na produtividade da cana-de-açúcar; desenvolver um Sistema informatizado para cálculo do balanço nutricional e para recomendação de corretivos e fertilizantes para essa cultura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cana-de-açúcar: origem, solos e sistema produtivo

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum*, própria de climas tropicais e subtropicais, provavelmente originária do Sudeste da Ásia. Há várias espécies do gênero *Saccharum* (*S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. robustum* e outras), mas as variedades hoje em uso são quase todas híbridos intergenéricos. Nelas, procura-se aliar a rusticidade de espécies, como *S. spontaneum*, às boas qualidades das variedades nobres de *S. officinarum* (GOMES & LIMA, 1964).

Por outro lado, ARANHA & YAHN (1987) esclarecem que a cana-de-açúcar era muito difundida na Índia Ocidental, devendo, portanto, originar-se de alguma espécie nativa daquela região. Já por volta dos anos 327 a.C., era uma cultura importante naquele País, tendo sido introduzida no Egito por volta de 641 de nossa era e em 755 na Espanha. Desde aquela época, seu cultivo vem se estendendo por quase todos os Países tropicais e subtropicais.

Dentre as zonas para as quais a cana-de-açúcar se expandiu no Ocidente, foi nas Américas onde mais se desenvolveu, ocupando extensas áreas e constituindo, desde os tempos coloniais, a principal atividade de diversas regiões. No Brasil, o cultivo da cana-de-açúcar está presente em

todos os estados e, em apenas alguns deles, essa atividade não tem representatividade econômica. De acordo com CARVALHO (1997), na safra 1996/97, os oito principais estados produtores eram São Paulo, Alagoas, Paraná, Pernambuco, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Rio de Janeiro.

Nos estados nordestinos, praticamente toda área plantada com cana-de-açúcar foi remanescente da floresta atlântica, principalmente da floresta subperenifolia (JACOMINE et al., 1973), comprometendo seriamente o ecossistema natural daquela região, até então, representada por uma formação densa, alta, rica em variadas espécies e que ainda hoje ocupa uma área representativa da zona úmida costeira. A grande extensão do território brasileiro, bem como o cultivo de mais de quatro milhões de hectares, distribuídos por todos os estados, possibilitam que a cana cresça nos mais variados tipos de solo. Assim, de modo geral, a cana-de-açúcar produz sob condições edáficas muito diversas.

Conforme YATES (1977), na prática, a cana-de-açúcar tem se mostrado bastante adaptável, sendo cultivada em solos de textura muito variável, desde os arenosos até os muito argilosos e, também, em solos com altos teores de matéria orgânica, como é o caso dos solos hidromórficos no Rio de Janeiro (Quadro 1). Essa adaptabilidade a diferentes condições de solo e clima permite que a colheita da cana-de-açúcar seja realizada praticamente durante todo o ano, possibilitando uma ininterrupta produção de açúcar e álcool, o que favorece a agroindústria da cana no Brasil em relação ao abastecimento do mercado internacional.

Por outro lado, essa diversidade de solo em que a cana-de-açúcar é cultivada pode, de certa forma, tender para o desenvolvimento de modelos mais regionalizados. No entanto, a possibilidade de predição de um modelo global em condições diversas de solo, certamente será mais consistente pela amplitude dos dados utilizados, possibilitando recomendações mais adequadas de corretivos e de fertilizantes em diferentes solos.

De acordo com suas características químicas, os solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil foram divididos em diferentes classes (Quadro 2), permitindo, dessa maneira, classificá-los quanto à aptidão agrícola para o cultivo da cana.

Quadro1. Ocorrência dos principais solos cultivados com cana-de-açúcar em alguns estados brasileiros

Estado	Solo	Ocorrência
		%
Rio de Janeiro	Latossolos, Argissolos e associações	54
	Gleissolos	38
	Neossolos Flúvicos	5
	Outros (Neossolos Quartzarênicos)	3
Total		100
Alagoas	Latossolos Vermelho-Amarelos	33
	Argissolos Vermelho-Amarelos	55
	Gleissolos	4
	Neossolos Flúvicos	6
	Outros	2
Total		100
Pernambuco	Latossolos Vermelho-Amarelos	49
	Argissolos Vermelho-Amarelos	33
	Luvissolos	12
	Gleissolos	2
	Neossolos Flúvicos	3
	Outros	1
Total		100
São Paulo	Latossolos Vermelhos	55
	Argissolos Vermelho-Amarelos	9
	Nitossolos	4
	Outros	32
Total		100

Fonte: Glória & Orlando Filho (1981).

Como sistema produtivo, a cana-de-açúcar é constituída por um sítio de produção (uma planta), representado pelas folhas fotossinteticamente ativas, um sistema de escoamento e distribuição do produto fotossintetizado, vários sítios de consumo (raízes, colmos, folhas jovens, tecidos meristemáticos e órgãos reprodutores) e um sítio de acúmulo e armazenamento de sacarose, representado pelos vacúolos das células dos internódios dos colmos (MACHADO, 1987).

Quadro2. Características químicas e classes de interpretação da fertilidade dos solos cultivados com cana-de-açúcar no Brasil

Característica	Classe				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
CTC (cmol _c dm ⁻³)	< 2	2-6	6-12	> 12	-
V(%)	< 10	10-20	20-40	> 40	-
SB (cmol _c dm ⁻³)	< 2	2-3	3-4	> 4	-
m (%)	-	< 20	20-40	40-80	> 80
Ca ²⁺ + Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	-	< 0,5	0,5-1,3	1,3-2,6	> 2,6
K (cmol _c dm ⁻³)	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,8	> 0,8
P (mg dm ⁻³)	< 5	5-9	9-16	16-34	> 34
PST (%)	-	< 6	6-15	> 15	-
CE a 25°C (dS m ⁻¹)	< 2	2-4	4-8	8-15	> 15

Fonte: MAVSUPLAN (1981); IAA/SONDOTÉCNICA (1983); MARINHO & ALBUQUERQUE (1983); ORLANDO FILHO & RODELLA (1983); MARINHO (1984); ZAMBELLO JÚNIOR (1984).

A eficiência da integração desses sistemas determina a produtividade da cultura. No entanto, como sistema biológico, sua dinâmica é influenciada, tanto por fatores intrínsecos à planta (genéticos e fisiológicos), como pelo ambiente.

O acúmulo de matéria seca em cana apresenta a forma de uma curva sigmóide, podendo ser dividido em três fases: (a) fase inicial em que o crescimento é lento; (b) fase de crescimento rápido, onde 70 a 80 % de toda matéria seca é acumulada; (c) e uma fase final em que o crescimento é novamente lento, com a planta acumulando apenas cerca de 10 % de toda sua matéria seca. Tal padrão de crescimento é característico para diversas variedades, locais e ciclos de cultivo (MACHADO et al., 1982; IRVINE, 1983; SILVEIRA, 1985).

A concentração de sacarose na cana-de-açúcar em um dado momento é o resultado da integração de vários mecanismos bioquímicos que envolvem a síntese, a migração e o acúmulo desse açúcar no colmo (VIEIRA, 1988). A eficiência de cada um desses processos parece estar condicionada a uma complexa regulação de fatores endógenos e exógenos que, por sua vez, são dependentes das relações fonte/dreno. Dentre tantos fatores, a fertilidade do solo exerce papel preponderante nesse sistema, dada sua responsabilidade pelo início do processo produtivo, por meio de uma adequada disponibilidade de nutrientes.

2.2. Efeito da nutrição mineral na cultura da cana-de-açúcar

O crescimento do rendimento agrícola e industrial foi em grande parte influenciado pelas pesquisas realizadas em nutrição de plantas e fertilidade dos solos. Muitos pesquisadores se destacaram nessa área e, nas décadas de 50, 60 e 70, publicaram seus trabalhos (DILLEWIJH, 1952; STANFORD, 1963; HUMBERT, 1968; ALEXANDER, 1973) com ampla repercussão na comunidade científica. Além disso, periódicos internacionais como *The Hawaiian Planters Record*, *Indian Sugar*, *International Sugar Journal* e outros publicaram numerosas pesquisas na área de nutrição da cana-de-açúcar. Entretanto, reportam-se a trabalhos até meados da década de 70 e em condições de solo e clima bem distintos dos brasileiros cultivados com cana, sem, no entanto, deixarem de ter influenciado, marcadamente, as pesquisas em nutrição de cana-de-açúcar no Brasil.

Nesse sentido, um grande número de pesquisadores brasileiros direcionou seus trabalhos para a fertilidade do solo e nutrição mineral da cana-de-açúcar. Uma ampla revisão realizada por MALAVOLTA & HAAG (1964) enfatizava a baixa fertilidade do solo e o uso inadequado de fertilizantes como sendo os principais responsáveis pelos baixos rendimentos da lavoura canavieira. No entanto, nesse trabalho, os autores citam a pesquisa de Catani, realizada em 1963, como sendo a que, na época, mais contribuiu para mostrar as reais exigências nutricionais da cana. Essa pesquisa já demonstrava a preocupação com a demanda de nutrientes pela cultura.

2.2.1. Teor e extração de nutrientes pela cana-de-açúcar

O trabalho de ORLANDO FILHO (1978), sobre a extração de macro e de micronutrientes em função da idade em três tipos de solo no estado de São Paulo, contribuiu efetivamente para o conhecimento da nutrição da cana-de-açúcar, alavancando, a partir de então, a realização de numerosos trabalhos de pesquisa nesta área (Quadros 3 e 4). Seguiram-se os experimentos de correlação e de calibração de nutrientes, principalmente para P e K, estabelecendo-se seus níveis críticos para produções que maximizavam a eficiência econômica dos fertilizantes (CAVALCANTI et al., 1979ab; ORLANDO FILHO & ZAMBELLO JÚNIOR, 1980; MANHÃES et al., 1981; LIMA FILHO et al., 1982; ORLANDO FILHO & RODELLA, 1983; ALVAREZ et al., 1991).

Para recomendação de fertilizantes baseada num balanço nutricional é necessário saber qual a quantidade de nutrientes que uma cultura absorve e exporta do solo para uma determinada produtividade. Nesse sentido, faz-se oportuno diferenciar absorção de exportação, ou seja, tudo aquilo que a planta retira do solo como nutriente e armazena em suas diversas partes é denominado absorção ou acúmulo. Apenas, a quantidade de nutrientes que sai da planta na forma de produto colhido é que se chama de exportação.

Na cultura da cana-de-açúcar, o colmo é o produto colhido; então, todos os nutrientes que se encontram no colmo na colheita serão exportados. Os nutrientes acumulados nas outras partes da planta, como folhas, principalmente, podem retornar, pelo menos em parte, ao sistema. Já as raízes, formadas durante a implantação ou reforma de um canavial serão, em parte, reaproveitadas para rebrota das socarias (DILLEWIJH, 1952). Isso significa que parte dos nutrientes acumulados durante a implantação ou reforma não deixa o sistema solo-planta, pois serão utilizados em futuras brotações.

Quadro 3. Teor e conteúdo de macronutrientes em diferentes partes da cana planta e soca variedade CB-453 em função da idade, em um Latossolo Vermelho do estado de São Paulo

Nutriente	Componente	Idade (mês)													
		Teor							Conteúdo						
		4	6	8	10	12	14	16	4	6	8	10	12	14	16
dag kg ⁻¹							kg ha ⁻¹								
Cana planta ⁽¹⁾															
N	Colmo	1,64	1,32	0,96	0,79	0,52	0,38	0,34	3,1	13,0	34,5	56,3	66,6	92,2	108,1
	Folhas	0,98	0,83	0,68	0,81	0,81	0,62	0,61	28,1	37,4	47,4	67,8	59,0	85,9	78,6
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	31,3	50,4	81,9	124,1	145,6	177,5
P	Colmo	0,09	0,07	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,2	0,7	1,2	3,7	6,4	11,5	12,6
	Folhas	0,09	0,08	0,06	0,08	0,10	0,08	0,07	2,6	3,7	4,2	6,9	9,5	10,2	7,0
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	2,8	4,4	5,4	11,0	16,0	21,7
K	Colmo	1,11	1,01	0,42	0,63	0,47	0,38	0,26	2,0	9,8	15,2	44,4	61,6	93,5	80,2
	Folhas	1,34	1,20	0,84	0,95	1,14	0,94	0,89	38,2	54,9	58,0	80,2	112,4	128,0	114,1
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	40,3	64,7	73,2	124,6	174,0	221,5
Ca	Colmo	0,61	0,33	0,24	0,27	0,28	0,27	0,27	1,2	3,3	8,6	19,1	35,7	65,6	85,1
	Folhas	0,51	0,49	0,47	0,41	0,46	0,44	0,50	14,5	22,0	32,5	34,0	45,0	60,1	64,1
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	15,7	25,3	41,1	53,1	80,8	125,7
Mg	Colmo	0,39	0,27	0,18	0,18	0,14	0,16	0,13	0,8	2,6	6,5	12,8	17,7	37,7	39,6
	Folhas	0,16	0,16	0,16	0,18	0,16	0,15	0,15	4,4	7,4	11,3	15,0	15,2	20,5	18,7
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	5,2	10,0	17,8	27,8	32,9	58,2
S	Colmo	0,42	0,27	0,18	0,12	0,08	0,09	0,12	0,8	2,6	6,2	8,5	9,7	24,8	36,6
	Folhas	0,26	0,32	0,25	0,20	0,24	0,19	0,18	7,5	14,2	17,4	16,8	23,4	26,0	22,7
	Total	-	-	-	-	-	-	-	-	8,4	16,9	23,6	25,3	33,1	50,8

Continua...

Quadro 3, Cont.

Nutriente	Componente	Idade (mês)													
		Teor							Conteúdo						
		4	6	8	10	12	14	16	4	6	8	10	12	14	16
dag kg ⁻¹							kg ha ⁻¹								
		Cana soca ⁽²⁾													
N	Colmo	1,73	0,51	0,34	0,26	0,26	-	-	1,9	26,1	52,4	57,6	89,4	-	-
	Folhas	1,28	0,85	0,75	0,72	0,63	-	-	35,6	67,8	80,0	74,4	76,7	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	37,5	93,9	132,4	132,0	166,1	-	-
P	Colmo	0,27	0,10	0,06	0,05	0,05	-	-	0,3	5,1	8,8	10,8	16,3	-	-
	Folhas	0,18	0,12	0,11	0,09	0,08	-	-	4,9	9,3	11,5	8,2	9,9	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	5,2	14,5	20,3	19,1	26,1	-	-
K	Colmo	3,15	0,87	0,47	0,34	0,30	-	-	3,5	45,2	71,8	73,6	102,0	-	-
	Folhas	2,14	1,15	1,20	1,08	1,02	-	-	59,4	90,5	129,1	110,9	124,5	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	62,9	135,7	200,9	184,5	226,5	-	-
Ca	Colmo	0,51	0,20	0,14	0,14	0,13	-	-	0,6	10,3	21,4	30,2	44,2	-	-
	Folhas	0,47	0,43	0,39	0,36	0,33	-	-	13,0	34,1	41,2	37,5	40,8	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	13,5	44,3	62,6	67,7	85,0	-	-
Mg	Colmo	0,53	0,19	0,14	0,12	0,12	-	-	0,6	10,2	21,8	26,3	40,8	-	-
	Folhas	0,21	0,18	0,18	0,16	0,14	-	-	5,9	14,7	18,8	17,0	17,6	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	6,4	24,9	40,6	43,3	58,4	-	-
S	Colmo	0,59	0,28	0,17	0,10	0,20	-	-	0,6	14,5	25,9	22,4	34,2	-	-
	Folhas	0,34	0,31	0,27	0,22	0,17	-	-	9,4	24,5	29,8	22,5	20,7	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	10,1	39,0	55,7	44,9	54,9	-	-

⁽¹⁾ Produtividade de 120 t ha⁻¹, ⁽²⁾ Produtividade de 100 t ha⁻¹.
 Fonte: ORLANDO FILHO (1978).

Quadro 4. Teor e conteúdo de micronutrientes em diferentes partes da cana planta e soca variedade CB-453 em função da idade, em um Latossolo Vermelho do estado de São Paulo

Nutriente	Componente	Idade (mês)													
		Teor						Conteúdo							
		4	6	8	10	12	14	16	4	6	8	10	12	14	16
		mg kg ⁻¹						g ha ⁻¹							
		Cana planta ⁽¹⁾													
B	Colmo	10,0	11,0	8,0	11,0	11,0	10,0	8,0	2	11	28	78	147	253	249
	Folhas	11,0	14,0	11,0	14,0	12,0	11,0	11,0	31	65	79	120	116	154	140
	Total	-	-	-	-	-	-	-	33	76	107	198	264	399	389
Cu	Colmo	16,7	12,7	10,2	8,2	7,7	8,0	7,7	3	12	14	58	99	194	243
	Folhas	10,2	13,0	10,7	12,5	12,5	12,2	11,7	29	59	76	103	121	168	151
	Total	-	-	-	-	-	-	-	32	72	112	151	221	362	394
Fe	Colmo	505,0	295,0	170,0	194,0	135,0	134,0	100,0	98	284	605	1.378	1.720	3.243	3.131
	Folhas	1.359,0	883,0	1.104,0	945,0	824,0	867,0	981,0	3.841	4.007	7.721	7.951	8.219	13.395	12.411
	Total	-	-	-	-	-	-	-	3.939	4.291	8.326	9.329	9.939	16.638	15.542
Mn	Colmo	91,0	60,0	37,0	45,0	48,0	50,0	42,0	18	62	137	321	619	1.213	1.332
	Folhas	136,0	146,0	114,0	129,0	151,0	142,0	150,0	385	675	797	1.045	1.479	1.950	1.916
	Total	-	-	-	-	-	-	-	403	737	934	1.366	2.098	3.163	3.248
Zn	Colmo	48,0	28,0	21,0	22,0	17,0	15,0	18,0	9	27	77	155	225	382	573
	Folhas	25,0	27,0	26,0	24,0	27,0	29,0	28,0	73	122	182	204	263	397	356
	Total	-	-	-	-	-	-	-	82	149	259	359	487	779	929

Continua...

Quadro 4, Cont.

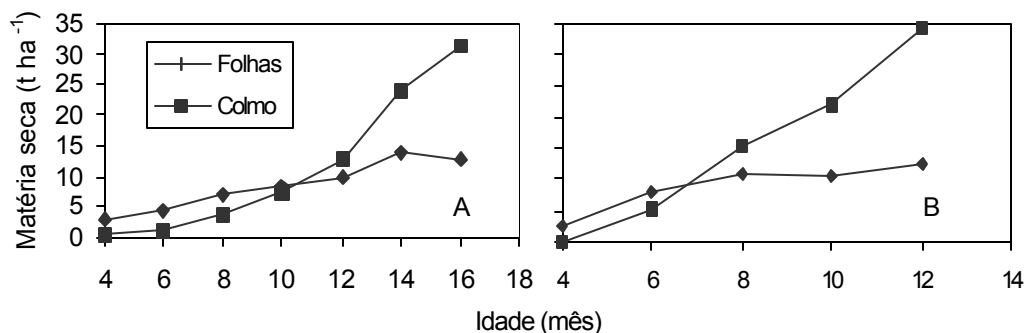
Nutriente	Componente	Idade (mês)													
		Teor							Conteúdo						
		4	6	8	10	12	14	16	4	6	8	10	12	14	16
mg kg ⁻¹							g ha ⁻¹								
Cana soca ⁽²⁾															
B	Colmo	10,0	7,0	6,0	4,0	4,0	-	-	1	35	97	87	145	-	-
	Folhas	9,0	7,0	8,0	5,0	5,0	-	-	24	54	82	56	64	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	25	92	179	144	209	-	-
Cu	Colmo	32,0	11,0	15,5	12,2	9,0	-	-	3	57	239	268	308	-	-
	Folhas	19,0	13,2	17,5	10,2	12,7	-	-	52	105	187	107	157	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	56	163	426	375	465	-	-
Fe	Colmo	1.151,0	576,0	114,0	70,0	51,0	-	-	126	2.980	1.771	1.551	1.791	-	-
	Folhas	1.721,0	1.729,0	1.059,0	1.024,0	797,0	-	-	4.775	13.715	11.400	10.731	9.869	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	4.901	16.695	13.171	12.282	11.660	-	-
Mn	Colmo	159,0	36,0	54,0	48,0	27,0	-	-	18	167	832	1.051	932	-	-
	Folhas	151,0	124,0	119,0	107,0	91,0	-	-	416	979	1.274	1.116	1.125	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	434	1.146	2.106	2.167	2.057	-	-
Zn	Colmo	54,0	22,0	14,0	12,0	10,0	-	-	6	117	213	270	341	-	-
	Folhas	22,0	19,0	20,0	19,0	16,0	-	-	60	153	218	202	195	-	-
	Total	-	-	-	-	-	-	-	66	270	431	472	537	-	-

⁽¹⁾ Produtividade de 120 t ha⁻¹, ⁽²⁾ Produtividade de 100 t ha⁻¹.

Fonte: ORLANDO FILHO (1978).

Portanto, no balanço nutricional, parte dos nutrientes acumulados nas folhas e nas raízes pode retornar ao sistema solo-planta, e deve ser necessariamente computada como uma das formas de entrada de nutrientes ao sistema.

Em cana planta, com exceção de Fe e K, há uma redução na taxa de acúmulo dos demais nutrientes nas folhas e uma maior alocação nos colmos entre o 140 e 160 mês, ou seja, no período que antecede a colheita (Quadros 3 e 4). Em cana soca, apesar de aos doze meses, o conteúdo de nutrientes nos colmos mostrar-se superior ao encontrado nas folhas, não ocorre redução na taxa de acúmulo, como em cana planta. O importante, no momento, é que esse investimento em alocar mais nutrientes em colmo em relação à folha irá refletir numa inversão na produção de matéria seca, que ocorre a partir do 10^o mês em cana planta e 6^o mês em cana soca (Figura 1).



Fonte: Adaptado de ORLANDO FILHO (1978).

Figura 1. Produção de matéria seca de folhas e colmos em função da idade em cana planta (A) e cana soca (B).

2.2.2. Nitrogênio

Em cana-de-açúcar, diversos trabalhos têm mostrado que o teor de N na planta diminui com a idade (ALEXANDER, 1973; ORLANDO FILHO, 1978; CLEMENTS, 1980; SILVA & CASAGRANDE, 1983). Com relação aos efeitos nos processos fisiológicos, observam-se resultados semelhantes

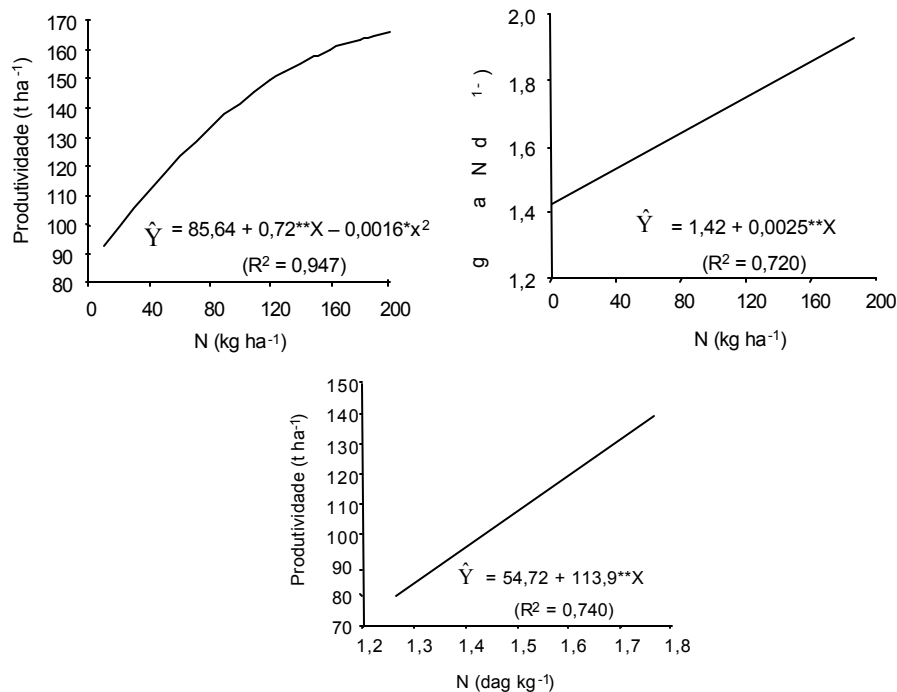
aos relatados para outras culturas, como aumento no crescimento da parte aérea, no número de perfilhos e diminuição no teor de sacarose quando em presença de elevadas concentrações de N (SILVEIRA, 1980). Por outro lado, quando se estuda o efeito de doses crescentes de fertilizantes nitrogenados sobre a produção de cana-de-açúcar, os resultados são contraditórios. No Brasil, na região Sudeste, em geral, não se observou efeito positivo de doses de nitrogênio na produção de cana planta de 18 meses em solos argilosos (ORLANDO FILHO et al., 1977; RUSCHEL & VOSE, 1982; ZAMBELLO JÚNIOR & AZEREDO, 1983). No entanto, ALVAREZ et al. (1991), em dezenove ensaios de adubação NPK em diferentes regiões paulistas, encontraram aumentos médios de $15,2 \text{ t ha}^{-1}$ de cana por efeito da maior dose de N aplicada (180 kg ha^{-1}). PAES (1994), trabalhando em solo argiloso, em Viçosa – MG, encontrou aumentos significativos na produção para doses de até 100 kg ha^{-1} de N.

No Nordeste, PEREIRA & ARAGÃO (1977), em trabalho realizado num Vertissolo do Submédio São Francisco, encontraram aumentos de produtividade até a dose de 180 kg ha^{-1} de N. Da mesma forma, CAVALCANTI et al. (1979ab) verificaram que, de sete experimentos realizados no estado de Pernambuco, as doses econômicas encontradas variaram de 20 a 100 kg ha^{-1} de N, o que demonstra resposta positiva à fertilização nitrogenada em cana planta. Por outro lado, FARIA et al. (1983), estudando a influência de fontes e doses de N em área irrigada no Submédio São Francisco em Petrolina – PE, concluíram que as doses de N tiveram influência positiva e altamente significativa na produtividade e encontraram, também, relações lineares e positivas da produtividade e dos teores de N na folha com doses de N aplicadas (Figura 2). Os resultados encontrados por FARIA et al. (1983) podem ser explicados de acordo com SILVA & CASAGRANDE (1983) que comentam que a produtividade da cana aumenta com o incremento de doses de N, porém a planta apresenta maior umidade. Os autores afirmaram que existe uma correlação positiva entre conteúdo de N e a umidade, de modo que, canas bem supridas de água e N terão maior crescimento e, até certo ponto, menor rendimento.

Esses resultados tornam-se ainda mais controversos quando se admite que a cana soca responde satisfatoriamente à adubação

nitrogenada, contrariamente à cana planta. Para URQUIAGA et al. (1992), muitos fatores parecem contribuir para a inconstância das respostas à adubação nitrogenada, no caso da cana planta.

A presença marcante de microrganismos na rizosfera da cana é uma indicação de que a fixação biológica deve desempenhar importante papel na sua auto-suficiência em N. SALCEDO & SAMPAIO (1984ab) obtiveram baixa resposta da cana planta à adubação nitrogenada e justificaram este comportamento com base na quantidade de N na forma nítrica que encontraram no início do crescimento da cana planta. Em seus experimentos, esse valor aproximou-se de 50 kg ha⁻¹ de N, que poderia ter sido resultado de um período de acumulação entre a colheita do ciclo anterior e a reforma do canavial. Esse período de mineralização de N, no caso da rebrota (cana soca), é muito curto, fazendo com que a soca encontre o solo quase sem N disponível, respondendo, dessa forma, satisfatoriamente à fertilização com N.



Fonte: adaptado de FARIA et al. (1983).

Figura 2. Produtividade da cana-de-açúcar e teor de N na folha em função de doses de N e relação entre produtividade e o teor de N na folha, em cultura irrigada, em Petrolina-PE.

Da mesma forma, outros pesquisadores (ZAMBELLO JÚNIOR & ORLANDO FILHO, 1981; BITTENCOURT et al., 1986) comentam que a maior eficiência de utilização de N pela cana planta, ou sua menor resposta à adubação nitrogenada justifica-se pelo fato de a mesma ter à sua disposição maior reserva de N no solo. Com a reforma do canavial, as operações de preparo do solo aumentariam sua aeração, facilitando a mineralização da matéria orgânica incorporada, tal como raízes e resíduos do ciclo anterior, propiciando, assim, a entrada de N no sistema solo-planta.

Se no Nordeste as respostas da cana planta a N são mais pronunciadas, é possível que seja pelo baixo teor de matéria orgânica dos solos, restringindo a entrada de N e favorecendo a fertilização nitrogenada.

Por outro lado, muitos trabalhos têm relatado a existência de associações de gramíneas tropicais com bactérias fixadoras de N (N_2), as quais em condições favoráveis podem contribuir significativamente para a demanda de N (RINAUDO, 1971; DÖBEREINER et al., 1972; DÖBEREINER & DAY, 1975; BÜLOH & DÖBEREINER, 1975). O primeiro trabalho no Brasil que revelou o potencial da cana-de-açúcar de se beneficiar da fixação biológica do N_2 foi o de DÖBEREINER (1959). Atualmente, sabe-se que há um sistema fixador de N_2 na rizosfera dessa planta, constituído de bactérias aeróbias, anaeróbias facultativas e anaeróbias (RUSCHEL et al., 1978), chegando inclusive a ser responsável por 17 % do N acumulado na planta, como demonstrou VOSE (1980). No entanto, a presença de bactérias fixadoras de N_2 não se resume apenas à rizosfera de plantas de cana-de-açúcar. GRACIOLLI (1982) isolou e identificou bactérias em raízes, folhas e colmos, concluindo que a população destas bactérias nestes órgãos varia quantitativa e qualitativamente, contribuindo para satisfazer a demanda de N da cultura.

2.2.3. Potássio

Sem tantas controvérsias como para o N, o K é um nutriente que influencia satisfatoriamente quando empregado como fertilizante na cultura da cana-de-açúcar. Por ser acumulado em maiores quantidades (Quadro 3), quando não suprido adequadamente, pode causar sérios prejuízos à produtividade da cultura da cana.

MARINHO et al. (1975), estudando a influência de doses crescentes de N, P e K no rendimento dos canaviais de Alagoas, mostraram que mesmo nas maiores doses de K aplicadas (300 kg ha^{-1}), dos nutrientes pesquisados, foi o único que não causou nenhum efeito depressivo nas produções de cana planta e soca. ESPIRONELO et al. (1981) encontraram aumentos na produtividade da ordem de 10 a 18 % em doses de 160 kg ha^{-1} de K aplicadas. No entanto, contrariamente, AZEREDO et al. (1984), no estado do Espírito Santo, mostraram que elevadas doses de K (175 kg ha^{-1}) não afetaram as produções da cana planta nem da soca, apesar de seus baixos teores no solo. Contudo, esses autores atribuem a baixa resposta da cana ao K como uma possível perda do nutriente por lixiviação pelas características dos solos e pelo experimento ter sido realizado num período em que ocorreram chuvas intensas.

Em trabalho mais recente, ALVAREZ et al. (1991), em Latossolo Roxo, mostraram, em dezenove experimentos, que a aplicação de K proporcionou o maior ganho de produtividade ($21,3 \text{ t ha}^{-1}$) na dose de 200 kg ha^{-1} .

2.2.4. Fósforo

Dentre os três macronutrientes mais presentes nas fertilizações da cana-de-açúcar, o P tem sido empregado, especialmente em cana planta, em altas doses. Os efeitos residuais deste nutriente não têm permitido respostas positivas em cana soca, porém adubações de manutenção com P têm se mostrado imprescindíveis, principalmente para a maximização das respostas das adubações com N e K (SILVA, 1991).

Os resultados experimentais com aplicação de P são altamente positivos (ALBUQUERQUE & MARINHO, 1979; ORLANDO FILHO & ZAMBELLO JÚNIOR, 1980; LIMA FILHO et al., 1982; RODELLA & MARTINS, 1988). Por outro lado, o efeito dessa adubação na cana soca tem se mostrado contraditório. Os trabalhos de ZAMBELLO JÚNIOR et al. (1977) e PENATTI et al. (1986) mostraram que, mesmo em solos pobres em P, a resposta à adubação fosfatada não ocorreu. Outras pesquisas, no entanto, encontraram respostas ao uso de fertilizantes fosfatados em cana soca, como as realizadas por ALBUQUERQUE et al. (1981) e ZAMBELLO JÚNIOR et al. (1981).

A ausência de resposta a P em cana soca pode estar relacionada a alguns fatores, tais como efeito residual do P aplicado em cana planta (GUIMARÃES et al., 1975b; MEYER, 1980); sistema radicular estabelecido e distribuído no volume de solo explorado; dose de P aplicada no plantio da cana planta.

ALBUQUERQUE & MARINHO (1984) mostraram que, quanto maior a dose de P aplicada no plantio, maior será o efeito residual e, portanto, menores serão as possibilidades de haver resposta às adições de P na cana soca. Por outro lado, a eficiência da cana em absorver P do solo está diretamente relacionada à sua capacidade em explorá-lo. Assim, a cana soca, ainda que possua um ciclo menor (12 meses, em média) do que a cana planta (18 meses, em média), tem a vantagem de iniciar seu crescimento com um sistema radicular estabelecido, sendo esta uma das possíveis razões para a maior facilidade da cana soca em aproveitar o P disponível (KORNDÖRFER, 1990).

A eficiência agrônômica do uso de fertilizantes fosfatados é influenciada por uma série de fatores, tais como acidez do solo, modo de aplicação, reatividade dos fosfatos, tipo de planta e, especialmente, do poder tampão de fosfato do solo. A maior ou menor competição entre planta e solo pelo P aplicado como fertilizante faz com que a planta se ajuste para utilizar o P que lhe é colocado à disposição (NOVAIS & SMYTH, 1999). Dados disponíveis têm mostrado grande ajuste da planta à utilização do P absorvido em solos com diferentes valores de capacidade tampão de P (MUNIZ et al., 1985; FABRES et al., 1987; FONSECA et al., 1988; MELLO et al., 1993; NOVAIS et al., 1993).

A cana-de-açúcar possui um ciclo de crescimento muito particular, que difere das demais culturas. O ciclo de 18 meses, em média, tende a favorecer o aproveitamento das fontes menos reativas como é o caso de fosfatos naturais. Por outro lado, a localização do adubo no fundo do sulco e a imobilização no solo por períodos longos de tempo (quatro anos em média) não favorecem a eficiência desses fosfatos (KORNDÖRFER, 1990). Trabalhos realizados especificamente com cana-de-açúcar confirmam a vantagem agrônômica dos fosfatos mais reativos sobre os menos reativos

(ALVAREZ et al., 1965; ALBUQUERQUE et al., 1979; ALBUQUERQUE et al., 1981; SILVA et al., 1988).

Os primeiros ensaios com cana-de-açúcar, no sentido de encontrar um extrator de P do solo para diagnosticar a necessidade de adubação, foram realizados no Brasil por STRAUSS (1954), que comparou os teores totais do elemento com as frações extraídas por KOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ou por HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, que na época eram usados no Havaí. Nesses ensaios, esse autor obteve boas correlações com a produção relativa da cana-de-açúcar, sugerindo, ainda, o emprego da relação entre o P do solo e o teor de argila para melhorar a confiabilidade da recomendação.

Segundo SILVA (1991), na década de 70, no estado de São Paulo, o extrator mais utilizado para aferir as necessidades da adubação fosfatada era a solução de H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ e, no restante do País, o extrator Mehlich-1 (Carolina do Norte: solução biácida de HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ e H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$).

Posteriormente, BITTENCOURT et al. (1978) propuseram o uso de uma solução mais concentrada (H_2SO_4 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$) para medir o “disponível” em São Paulo, provavelmente pela maior capacidade de extração desta solução e sua melhor correlação com a resposta da cana-de-açúcar.

Pesquisas posteriores (MANHÃES & GLÓRIA, 1980; MANHÃES et al., 1981) confirmaram para os estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Zona da Mata de Minas Gerais, a estreita correlação desse extrator ($R^2 > 0,70$) com o acúmulo de P pela cana. Em função desses resultados experimentais, o IAA-PLANALSUCAR estabeleceu, por meio de um grande número de experimentos de campo, uma calibração abrangente para o extrator H_2SO_4 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, chegando, então, à recomendação de adubação fosfatada para cana-de-açúcar nos estados do Sul e Sudeste do País.

No estado de São Paulo, a partir da revisão feita por RAIJ (1978), deu-se início a um estudo sistemático da resina de troca aniônica para avaliar a disponibilidade de P para diferentes culturas e, entre elas, a cana-de-açúcar. O referido método é atualmente o mais utilizado para análise do P disponível do solo naquele estado. Por outro lado, em todos os outros

estados, Mehlich-1 é o método oficialmente adotado para avaliar a disponibilidade de P para a cultura da cana-de-açúcar. Entretanto, de acordo com o PLANALSUCAR, existe, para cada caso específico, controvérsia sobre o uso do extrator mais adequado para avaliar a disponibilidade de P do solo e recomendar adubações fosfatadas para essa cultura.

2.2.5. Cálcio e magnésio

No Brasil, há grande diversidade de regiões com características específicas de solo, clima e desenvolvimento econômico. Assim, tecnologias geradas em determinada região nem sempre poderão ser utilizadas em outras sem sofrer modificações para adaptá-las às condições locais.

Segundo SCHMELL & HUMBERT (1964), a cana-de-açúcar desenvolve-se bem em solos que se apresentam dentro de uma larga faixa de pH (4,0 a 8,3), sendo a cultura muito tolerante à acidez e à alcalinidade. Por outro lado, VIANA et al. (1983) mostraram que há grande variação entre as cultivares de cana, quanto à tolerância à acidez.

Resultados experimentais de calagem para cana-de-açúcar no Brasil (WUTKE et al., 1960; WUTKE & ALVAREZ, 1968; GUIMARÃES et al., 1975a; COPERSUCAR, 1977) demonstraram uma maior resposta ao suprimento de Ca e, ou, de Mg do que a uma ação neutralizante da acidez.

A calagem em solos para cultivo de cana-de-açúcar é prática antiga e largamente utilizada, apesar dos resultados contraditórios. CORDEIRO (1978) relata que nas regiões canavieiras a prática da calagem é de difícil previsão quanto às reais necessidades e quantidades recomendáveis. A maior dificuldade reside na escolha dos métodos de previsão da necessidade de calagem: se baseados na deficiência de cálcio e de magnésio ou se na necessidade de correção dos efeitos da acidez, usando o pH ou o teor de alumínio trocável como índices, em virtude dos diversos resultados contraditórios encontrados.

Vários métodos para estimar a necessidade de calagem são utilizados no País. No Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, foi adaptado o SMP (MIELNICZUK et al., 1969), enquanto em São Paulo e parte do Paraná, foi adaptado o da saturação por bases (QUAGGIO, 1983a). Nas outras regiões, principalmente na dos cerrados, o método

mais empregado é baseado no teor de Al e de Ca e Mg trocáveis, difundido principalmente por MOHR (1960) e CATE (1965). No Nordeste, os critérios para neutralização do Al trocável e elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis do solo são utilizados em forma excludente, sendo o maior valor obtido utilizado na recomendação da quantidade de calcário a aplicar, uma vez que, ao se neutralizar o Al trocável fornece-se Ca e Mg e vice-versa (MARINHO & ALBUQUERQUE, 1983).

Na cultura da cana-de-açúcar, o método para neutralização do Al trocável e elevação dos teores trocáveis de Ca e Mg do solo tem sido largamente estudado, sendo de fundamental importância o conhecimento dos níveis críticos de Ca e de Mg trocáveis, bem como o limite de tolerância da cultura à saturação por alumínio do solo.

No Brasil, os níveis críticos de Ca e Mg trocáveis, determinados por CORDEIRO (1978), foram de 0,28 e 0,25 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente. ZAMBELLO JÚNIOR & ORLANDO FILHO (1981) encontraram 0,75 e 0,67 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e BENEDINI (1988) encontrou 1,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para o Ca e 1,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg trocáveis. No estado do Rio de Janeiro, AZEREDO et al. (1981) sugeriram os níveis críticos de 1,6 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg trocáveis.

No estado de Alagoas, o IAA/PLANALSUCAR (1980) estabeleceu o nível crítico de 1,25 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca + Mg. Para saturação por alumínio encontrou-se como limite de tolerância o valor de 35 %.

Na região de cerrados, RODELLA et al. (1984) encontraram como nível crítico de Ca trocável o valor de 0,65 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ e para Mg trocável 0,17 a 0,34 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$. Os autores encontraram uma saturação por alumínio tolerável de apenas 25 %.

Diante do fato de que os resultados experimentais demonstram uma maior resposta da cana-de-açúcar ao fornecimento de Ca e Mg em relação a uma efetiva correção da acidez, é possível desenvolver um método para recomendação de Ca e Mg dentro de uma filosofia de balanço nutricional, em que o pH e a capacidade tampão do solo são de fundamental importância.

2.2.6. Enxofre

O enxofre é um nutriente que as plantas acumulam em quantidades relativamente elevadas. Não poderia deixar de ser diferente no caso da cana-de-açúcar (Quadro 3). Apesar disso, a legislação brasileira sobre fertilizantes não faz exigências quanto à presença desse nutriente nas formulações (VITTI et al., 1988). Especificamente em cana, a prática da queimada por ocasião da colheita causa uma expressiva volatilização do S contido no material vegetal, agravando, ainda mais, possíveis deficiências deste nutriente a curto prazo.

2.2.7. Micronutrientes

O estudo de micronutrientes em cana-de-açúcar tem sido pouco relatado na literatura. Em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste pobres em micronutrientes, recomenda-se aplicar de 2 a 4 kg ha⁻¹ de Zn, obtendo-se respostas significativas à adubação com este nutriente (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998).

MARINHO (1988) faz referência à deficiência de Fe, Mn e Cu na cultura da cana-de-açúcar nos estados do Nordeste. Em Santa Catarina, há evidência de deficiência de Mn e no Rio de Janeiro, apenas de Cu. SOBRAL & WEBER (1983) citam problemas de deficiência de Fe em cana planta apenas em solos arenosos, de ampla ocorrência em algumas áreas dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. É comum, porém, em outras áreas de cultivo no Brasil, o aparecimento passageiro da deficiência de Fe em cana soca no início de crescimento da cultura. Entretanto, a sintomatologia da deficiência inicial não está relacionada com a disponibilidade de Fe do solo, mas à dificuldade de translocação do nutriente dos ramos velhos para os novos, até a emissão do novo sistema radicular (ZAMBELLO JÚNIOR & ORLANDO FILHO, 1981).

Sintomas de deficiência de Mn são algumas vezes descritos em cultivos de cana-de-açúcar no Nordeste. MARINHO (1983) obteve, em Alagoas, resposta de cana soca, que apresentava sintomas de deficiência de Mn, à aplicação superficial de 7,5 kg ha⁻¹ de Mn ao solo.

SULTANUM (1974) descreve sintomas de deficiência de Cu em cana-de-açúcar em condições de campo, comuns em solos de baixa

fertilidade do Nordeste. MARINHO & ALBUQUERQUE (1981) mostraram respostas à aplicação de Cu em solos que apresentavam $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu, quando o nível crítico, encontrado por SANTOS & SOBRAL (1980) era de $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu pelo Mehlich-1.

Ficou evidente que os problemas nutricionais relacionados com micronutrientes resumiram-se, praticamente, a solos de baixa fertilidade cultivados com cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. No entanto, a prática da agricultura intensiva, sempre em busca de maiores produtividades, poderá causar sérios prejuízos à cultura canavieira, principalmente com relação àqueles micronutrientes que se acumulam em maiores quantidades (Quadro 4).

2.3. Recomendações de adubação e estado nutricional da cultura da cana-de-açúcar no Brasil

As recomendações de adubação nos estados brasileiros são realizadas por meio de tabelas de recomendação que se baseiam em estudos de calibração. No caso específico da cana-de-açúcar, as recomendações mais recentes são as dos estados de Pernambuco (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998) e de Minas Gerais (RECOMENDAÇÕES PARA USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS, 1999).

Em Pernambuco, a tabela de recomendação, apesar da preocupação com a produtividade esperada, com as variedades mais produtivas, com teores críticos de micronutrientes no solo, é, no entanto, omissa quanto à influência da capacidade tampão dos solos na disponibilidade de nutrientes, principalmente P. Assim, na recente tabela (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998), tanto os solos arenosos, como os argilosos e intemperizados, têm a mesma recomendação de P, quando a pesquisa mostra que a capacidade tampão dos solos é de fundamental importância na dinâmica deste elemento no sistema solo-planta (NOVAIS & SMYTH, 1999).

O boletim técnico 100 do estado de São Paulo (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996) recomenda para cana planta 30 kg ha^{-1} de N para uma produtividade menor do que 100 t ha^{-1} de colmos e os mesmos 30 kg ha^{-1} de N para

produtividades superiores a 150 t ha^{-1} . A exportação de N em 100 t de colmos frescos é da ordem de 102 kg ha^{-1} , admitindo-se uma umidade de 70% e uma concentração final de N na matéria seca dos colmos de $0,34 \text{ dag kg}^{-1}$ (ORLANDO FILHO, 1978). Para 150 t ha^{-1} , admitindo-se as mesmas condições, a exportação de N é da ordem de 153 kg ha^{-1} . Se esta recomendação é para um solo com o mesmo teor de matéria orgânica, como a cultura irá produzir 150 t ha^{-1} de colmo, se há um déficit de N de no mínimo 51 kg ha^{-1} ?

ORLANDO FILHO (1976), estudando o estado nutricional da cana-de-açúcar, em dezesseis variedades cultivadas em quatro grandes grupos de solo, observou diferenças varietais e de solo quanto aos teores foliares de nutrientes (Quadro 5). Nesse trabalho, o autor concluiu que: (a) Independentemente do grande grupo de solo, há influência varietal nos teores foliares dos nutrientes; (b) O grande grupo de solo influi no teor de nutrientes das folhas das variedades; (c) Em vista da influência varietal e do solo no teor de nutrientes das folhas, verifica-se a inconveniência de uma generalização do nível crítico; (d) Há dificuldade na escolha de uma variedade que represente as demais para o estabelecimento dos padrões de nível crítico foliar.

Assim, pode-se afirmar que tanto as variedades quanto os solos apresentaram comportamento diferenciado no que diz respeito ao acúmulo de nutrientes. Isto sugere que características físicas, químicas e, ou, físico-químicas dos solos são variáveis fundamentais para o desenvolvimento de um Sistema de balanço nutricional que objetive recomendar fertilizantes.

Quadro 5. Teores foliares médios (\bar{Y}) de N, P, K, Ca, Mg e S e seus coeficientes de variação (CV) em dezesseis variedades de cana planta cultivadas em quatro grandes grupos de solo do estado de São Paulo

Solo	N		P		K		Ca		Mg		S	
	\bar{Y}	CV	\bar{Y}	CV	\bar{Y}	CV	\bar{Y}	CV	\bar{Y}	CV	\bar{Y}	CV
	dag kg^{-1}	%	dag kg^{-1}	%	dag kg^{-1}	%	dag kg^{-1}	%	dag kg^{-1}	%	dag kg^{-1}	%
LR ⁽¹⁾	2,14	3,13	0,23	3,73	1,11	9,99	1,08	8,91	0,32	14,30	0,18	15,22

LE ⁽²⁾	2,27	4,25	0,20	7,96	1,30	5,76	0,92	7,17	0,24	13,17	0,24	21,18
TE ⁽³⁾	2,11	3,21	0,20	4,17	1,18	11,38	0,75	6,64	0,25	15,18	0,23	18,38
PVIS ⁽⁴⁾	2,11	3,60	0,30	7,79	1,33	8,23	1,10	10,99	0,14	20,84	0,29	18,38
\bar{V} solos	2,16	-	0,23	-	1,23	-	0,96	-	0,24	-	0,24	-
CV _{solo} (%)	3,54	-	6,45	-	8,95	-	9,03	-	15,29	-	18,99	-

⁽¹⁾ Latossolo Roxo (Latossolo Vermelho); ⁽²⁾ Latossolo Vermelho Escuro orto (Latossolo Vermelho);
⁽³⁾ Terra Roxa Estruturada (Nitossolo); ⁽⁴⁾ Podzólico Vermelho Amarelo variação Laras (Argissolo Vermelho-Amarelo).

Fonte: Adaptado de ORLANDO FILHO (1976).

3. ESTRUTURA DO SISTEMA

A estruturação das informações necessárias para modelar a demanda de nutrientes para determinada produtividade permite desenvolver um Sistema para cálculo do Balanço Nutricional e Recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da Cana-de-açúcar (SBNR-C). O balanço entre o que será preciso (demanda nutricional) e o que pode ser disponibilizado (suprimento) pelo solo representa a base de desenvolvimento do SBNR-C. O cálculo do balanço nutricional irá indicar a necessidade, ou não, da aplicação de corretivos e fertilizantes.

Esse Sistema apresenta algumas vantagens para o cálculo de doses recomendáveis de corretivos e fertilizantes. Em primeiro lugar, pode-se, conhecendo o que o solo é capaz de disponibilizar, prever qual será a produtividade de um determinado cultivo de cana-de-açúcar, sem a adição de fertilizantes (Figura 3).

Se o incremento de produtividade proporcionado pela adição de fertilizante (Figura 3B) é ou não economicamente viável é uma discussão imprópria para o momento; o mais importante, por hora, é a versatilidade que tem o SBNR-C para informar até que produtividade é possível alcançar-se com o nível de fertilidade em que determinado solo se encontra.

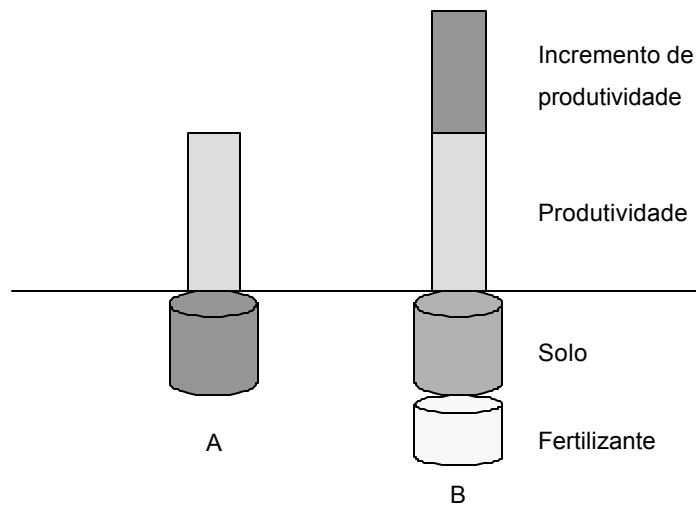


Figura 3. Representação esquemática de um sistema sem adição de fertilizantes (A) e com adição de fertilizantes, com o respectivo incremento de produtividade (B).

Para calcular qual a dose a ser recomendada pelo SBNR-C para os diversos nutrientes, cujas informações necessárias serão devidamente apresentadas no item seguinte, utilizar-se-á o fluxograma genérico (Figura 4) e a descrição dos principais processos envolvidos na recomendação.

As recomendações específicas de Ca e Mg (calagem), K, P, S e Zn, N, B e Cu e a simulação para cálculo das doses a serem recomendadas para dez solos de diferentes características químicas serão apresentadas após o desenvolvimento do Sistema. Portanto, nesta etapa será mostrado apenas, de forma genérica, como o SBNR-C será estruturado para qualquer nutriente.

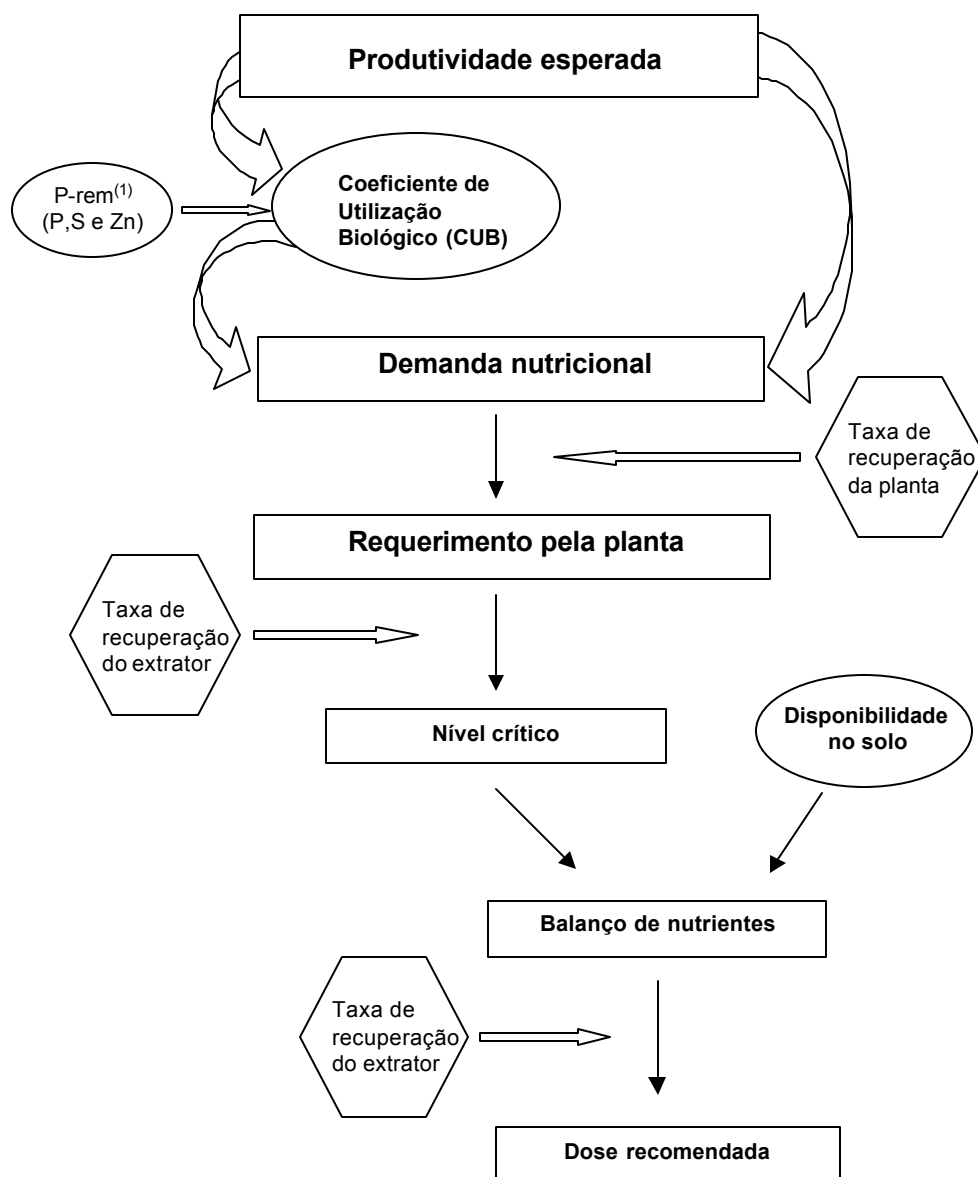


Figura 4. Fluxograma genérico para cálculo da dose a ser recomendada dos diversos nutrientes pelo SBNR-C.

⁽¹⁾ Teor de P da solução de equilíbrio, determinado após a agitação por uma hora da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) com CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, contendo 60 mg L^{-1} de P, na relação solo:solução 1:10 (ALVAREZ V. et al., 2000).

Inicialmente, estimou-se, por meio de regressões lineares, o Coeficiente de Utilização Biológica (CUB) dos nutrientes em função da produtividade e do P-rem (P, S e Zn). Em seguida, para se conhecer qual a demanda nutricional para a formação de toda a matéria seca da planta capaz de proporcionar uma determinada produtividade de colmos, é necessária a informação dessa produtividade esperada e, especificamente, no caso do P, S e Zn é necessária, também, a informação do valor do P-rem, como medida do poder tampão do solo. Portanto, com essas duas informações, representadas no fluxograma pelas elipses (entrada de dados), estima-se a demanda nutricional, representada pelo retângulo (saída de dados).

Para transformar a demanda nutricional em uma quantidade que deve ter o solo para proporcionar uma determinada produtividade (requerimento pela planta), divide-se a demanda pela taxa de recuperação da planta, representada no fluxograma pelo hexágono (dados armazenados). Para que toda esta quantidade que deve ter o solo seja expressa como teor do nutriente, multiplica-se essa quantidade pela taxa de recuperação do extrator (dados armazenados). Assim, obtém-se o nível crítico (saída de dados) do nutriente para aquela produtividade esperada e naquele determinado tipo de solo, quando for o caso do P, S e Zn. Nível crítico de produção, por definição, será o teor do nutriente no solo que corresponde à disponibilidade necessária para se obter uma determinada produtividade esperada, quando os outros nutrientes ou fatores de produção estão perto do nível ótimo (ALVAREZV., 1996).

Na fase seguinte do fluxograma, o que mede a disponibilidade no solo por determinado extrator (entrada de dados) representa o que o solo pode disponibilizar (suprir), ou seja, é o teor do nutriente existente atualmente no solo. Com isso, pode-se realizar o balanço de nutrientes no sistema solo-planta (saída de dados), subtraindo o teor dado pela análise do nível crítico no solo. É comum que o resultado desse balanço seja positivo, fazendo com que haja necessidade de uma entrada de fertilizante no sistema solo-planta. Entretanto, quando isto não ocorre, apenas a fertilidade atual do solo seria capaz de sustentar uma definida produtividade. Quando, porém, é necessária a recomendação, divide-se o

resultado do balanço de nutrientes pela taxa de recuperação do extrator (dados armazenados), obtendo-se a dose a ser recomendada do nutriente (saída de dados).

Pode-se, então, com apenas duas entradas de dados (produtividade esperada e análise do solo), estimar o coeficiente de utilização biológico, a demanda nutricional e o nível crítico no solo, além de calcular o balanço de nutrientes no sistema solo-planta e a dose a ser recomendada.

Dados como taxa de recuperação da planta e do extrator ficam armazenados em arquivos representados pelas equações de regressão definidas no desenvolvimento do Sistema.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

A proposta deste trabalho é a de desenvolver um Sistema que possa calcular o balanço nutricional e recomendar fertilizantes e corretivos para a cultura da cana-de-açúcar (SBNR-C). Dentro desse propósito, os métodos utilizados para desenvolvimento do Sistema serão ordenados em suas diversas etapas da maneira como se procede na prática, quando se inicia um programa de recomendação de corretivos e fertilizantes.

A amostragem do solo e da planta será considerada como etapa inicial de uma possível recomendação e, ou, como subsídio básico para a realização do balanço nutricional proposto.

Estabelecida a necessidade de calagem (Ca e Mg), os outros nutrientes foram divididos em quatro grupos: o do K; o do P, S e Zn; o do N; e o do B e Cu.

A recomendação de micronutrientes dependerá de uma análise foliar para diagnóstico de uma possível deficiência que deverá ser corrigida por uma adubação em cobertura e, ou, uma aplicação foliar do(s) nutriente(s) que se encontra(m) em condições de deficiência.

4.1. Desenvolvimento do Sistema para cálcio e magnésio

4.1.1. Estimativa dos CUB de cálcio e de magnésio

Para conhecer a demanda nutricional, inicialmente é necessário estimar o Coeficiente de Utilização Biológico (CUB) dos nutrientes em cana-de-açúcar. O CUB é um coeficiente que indica a quantidade de matéria seca na forma do produto comercial ou da parte vegetativa que a planta produz por unidade do nutriente acumulado nesses componentes (NOVAIS & SMYTH, 1999). O CUB é o inverso do teor do nutriente na parte da planta e pode ser expresso em kg kg^{-1} ou seja, kg de matéria seca produzida por kg do nutriente acumulado.

Teoricamente, o CUB, no caso específico do P, S e Zn, é função da produtividade e da capacidade tampão medida por características do solo, como teor de argila ou valor do P-rem. Para os demais nutrientes, considera-se o CUB como função apenas da produtividade.

A peculiaridade do cultivo da cana-de-açúcar, aliada aos diferentes CUB para folhas, colmos e raízes, permitiu estimar CUB diferenciados em cana planta e soca e considerar para a ressoca os mesmos CUB da soca. Por outro lado, tanto em cana planta como em soca, os CUB foram estimados para folhas e para colmos. No entanto, dados experimentais, até o momento, são insuficientes para o ajuste de um modelo que relacione produtividade esperada e CUB de raízes. Futuras versões, certamente poderão dispor dessa informação.

Para estimar os CUBs de Ca e de Mg, foram desenvolvidos modelos para colmo, folhas e raízes de cana planta e soca (Quadros 6 e 7). Teoricamente, a relação CUB em função da produtividade segue modelo curvilíneo decrescente, o que mostra que plantas mais produtivas são menos eficientes quanto à utilização biológica de nutrientes. Por outro lado, plantas que se desenvolvem em ambientes nutricionalmente limitantes, embora sejam menos produtivas, maximizam a utilização dos nutrientes, sendo, portanto, mais eficientes.

Quadro 6. Equações do coeficiente de utilização biológica (CUB) de cálcio (kg kg^{-1}) em função da produção de matéria seca de colmos, folhas e raízes de cana planta e soca (t ha^{-1})

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 464,14 - 4,9160^{**} X$; $\forall^{(1)} X$ entre 5 e 50 t ha^{-1} $\hat{Y} = 440, \forall X \leq 5 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 218, \forall X \geq 50 \text{ t ha}^{-1}$	0,976
• Folhas	$\hat{Y} = 259,98 - 3,9980^{**} X$; $\forall X$ entre 3,2 e 32 t ha^{-1} $\hat{Y} = 247, \forall X \leq 3,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 132, \forall X \geq 32 \text{ t ha}^{-1}$	0,889
• Raízes ⁽²⁾	$\hat{Y} = \bar{Y} = 800$	-
Cana soca ⁽³⁾		
• Colmo	$\hat{Y} = 613,21 - 6,7526^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1} $\hat{Y} = 590, \forall X \leq 3,4 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 384, \forall X \geq 33,9 \text{ t ha}^{-1}$	0,992
• Folhas	$\hat{Y} = 351,53 - 7,9429^{**} X$; $\forall X$ entre 2,2 e 21,7 t ha^{-1} $\hat{Y} = 334, \forall X \leq 2,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 179, \forall X \geq 21,7 \text{ t ha}^{-1}$	0,970

⁽¹⁾ \forall = para qualquer valor de produção de matéria seca dentro do intervalo de validade do modelo;

⁽²⁾ Dados experimentais, até o momento, são insuficientes para o ajuste de um modelo que relacione produtividade esperada e CUB de raízes; ⁽³⁾ Para estimar o CUB dos componentes em ressoca, consideram-se as mesmas funções da soca.

** Significativo a 1%.

Nesta primeira versão, porém, não foram ajustados modelos curvilineares para representar o fenômeno. No entanto, o ajuste de modelos lineares são mais consistentes que a simples fixação de um único valor do CUB para qualquer produtividade esperada.

Os dados utilizados para o ajuste de modelos que relacionam CUB com produtividade em cana planta e soca nos colmos e folhas foram obtidos do trabalho de ORLANDO FILHO (1978). O CUB de Ca para raízes foi obtido dos trabalhos de KORNDÖRFER et al. (1989) e PENATTI (1991).

Quadro 7. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de magnésio (kg kg^{-1}) em função da produção de matéria seca de colmos, folhas e raízes de cana planta e soca (t ha^{-1})

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 740,53 - 9,6799^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha^{-1} $\hat{Y} = 692, \forall X \leq 5 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 256, \forall X \geq 50 \text{ t ha}^{-1}$	0,860
• Folhas	$\hat{Y} = 811,15 - 15,8125^{**} X$; $\forall X$ entre 3,2 e 32 t ha^{-1} $\hat{Y} = 760, \forall X \leq 3,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 305, \forall X \geq 32 \text{ t ha}^{-1}$	0,813
• Raízes	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1.600$	-
Cana soca		
• Colmo	$\hat{Y} = 606,82 - 6,8596^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e $33,9 \text{ t ha}^{-1}$ $\hat{Y} = 584, \forall X \leq 3,4 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 374, \forall X \geq 33,9 \text{ t ha}^{-1}$	0,942
• Folhas	$\hat{Y} = 821,20 - 17,1464^{**} X$; $\forall X$ entre 2,2 e $21,7 \text{ t ha}^{-1}$ $\hat{Y} = 784, \forall X \leq 2,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 449, \forall X \geq 21,7 \text{ t ha}^{-1}$	0,789

** Significativo a 1 %.

O CUB de raiz para Mg poderia ter sido obtido do trabalho de AZEREDO (1982). No entanto, os dados encontrados por este pesquisador parecem superestimados, o que significa valores de CUB muito baixos, pelas melhores condições de absorção no Sistema hidropônico utilizado.

O trabalho de ORLANDO FILHO (1978) mostra que o acúmulo de Ca na parte aérea da cana é o dobro do de Mg. Considerando-se que estas relações serão mantidas nas raízes, então, como o CUB de Ca é de 800 kg kg^{-1} , o de Mg será de 1.600 kg kg^{-1} . Números como estes precisam ser confirmados em futuras versões do SBNR-C.

ORLANDO FILHO (1976), trabalhando com 16 variedades de cana em quatro grandes grupos de solo, observou diferenças quanto ao teor de nutrientes na folha +3, aos quatro meses de idade, quando as variedades foram cultivadas em diferentes solos. Mesmo assim, considera-se que para Ca e Mg isto não ocorre, pois são cátions trocáveis, o que significa que suas relações energéticas com o solo são de caráter essencialmente eletrostáticas. Portanto, o acúmulo desses nutrientes independe da capacidade tampão, ou seja, da capacidade de troca de cátions do solo. Assim, considera-se para solos com diferentes capacidades tampão a mesma produção de biomassa por unidade acumulada de Ca e de Mg.

4.1.2. Demanda de cálcio e de magnésio

Especificamente em cana-de-açúcar, será estimada a quantidade de nutriente necessária para formação de colmos, folhas e raízes em cana planta e colmos e folhas em cana soca, pois se considera que a demanda de nutrientes para formação de novas raízes em cana soca e ressoca será função da ciclagem proveniente das folhas e das raízes velhas do ciclo anterior. Para os micronutrientes, calcula-se a demanda para formação de toda a biomassa da planta, tanto em cana planta como em cana soca.

Após a estimativa dos CUB, pode-se calcular a demanda nutricional (D) para macronutrientes e para micronutrientes:

$$D = PDE/CUB$$

em que PDE é a produtividade esperada de matéria seca de colmo, ou folha ou raiz, em kg ha⁻¹; CUB é o coeficiente de utilização biológico em kg de matéria seca produzida por kg do nutriente acumulado.

HAAG (1965) cita que em plantas de cana bem nutridas, a distribuição da matéria seca é de 53,2 % para colmos, 34,1 % para folhas e 12,7 % para raízes. Com isso, a relação matéria seca de folhas/matéria seca de colmos é de 0,64, enquanto que a relação matéria seca de raízes/matéria seca de colmos é de 0,24. Essas relações são válidas para cana planta, soca e ressoca. Com essa informação, pode-se calcular a quantidade de matéria seca de folhas e de raízes a partir da matéria seca de colmos.

A umidade da matéria fresca de colmos de cana foi determinada por ORLANDO FILHO (1978), que encontrou um valor médio de 0,75 kg kg⁻¹. Isto significa que para uma produtividade de 100 t ha⁻¹ de colmos frescos há 25 t ha⁻¹ de colmos secos. Estima-se o que vai ser acumulado de matéria seca na planta utilizando a produção de matéria fresca, daí a importância dessa informação.

Por outro lado, considera-se que há um decréscimo de produtividade com os cultivos sucessivos da cultura, que se ajusta ao seguinte modelo das produtividades esperadas em função de colheitas sucessivas (CARVALHO & GRAÇA, 1976; RIVERA PINEDA, 1994):

$$\hat{Y} = 170,32 - 86,4082 * X + 21,9926^0 X^2 - 1,8700^0 X^3; (R^2 = 0,969) \text{ (Eq. 1)}$$

∇ X entre o 1^o e o 6^o corte

⁰ e * significativo a 10 e a 5 %, respectivamente.

em que Y é produtividade esperada (t ha⁻¹); X é o número de cortes da colheita de cana.

Por esta função, considera-se um decréscimo de produtividade de 32,2 % entre o cultivo da cana planta e da soca e de 25,7 %, em média, da soca para as ressorcas. Sendo assim, fixando-se a produtividade esperada para o primeiro cultivo, pode-se estimar a produtividade da soca e das ressorcas. Por exemplo, para uma produtividade esperada de 100 t ha⁻¹ de colmos em cana planta, estima-se que a produtividade da soca será de 67,8 t ha⁻¹ e das ressorcas, em média, de 50,3 t ha⁻¹ de colmos.

É provável que, em alguns casos, possa haver aumento de produtividade com o cultivo, principalmente quando outras variáveis relacionadas com a produtividade, como condições climáticas mais favoráveis ao cultivo da soca e, ou, da ressorca forem determinantes. No entanto, a expectativa mais comum em cultivos comerciais de cana-de-açúcar é um decréscimo de produtividade com as rebrotas sucessivas.

A aplicação de Ca e de Mg ao solo é rotineiramente realizada por meio da calagem. Assim, calcula-se a demanda total desses nutrientes para três cultivos sucessivos, ou seja, para cana planta, soca e primeira ressorca, fixando a produtividade esperada para cana planta e considerando

os decréscimos subseqüentes da produtividade nos cultivos de soca e primeira rессoca (Quadro 8).

Os calcários comerciais geralmente apresentam um efeito residual de 42 a 48 meses (ALCARDE, 1986), o que corresponde ao período de cultivo da cana planta até a primeira rессoca, permitindo prever as quantidades de Ca e de Mg que deverão ser disponibilizadas ao longo desse período para atender as exigências nutricionais. Desse modo, é provável que para o cultivo da segunda rессoca seja necessária uma nova calagem.

No entanto, esta não é uma prática comum em cultivos comerciais de cana-de-açúcar; porém, é possível que esta seja uma das causas da abrupta redução de produtividade em rессocas de quarto corte, chegando a ser 61,8 % da produtividade da cana planta e 43,7 % da cana soca, proporcionando uma perda substancial de produção anual ao final do ciclo de cultivo. Assim, calcula-se a demanda de Ca e de Mg para os cultivos sucessivos de segunda, terceira e quarta rессocas (Quadro 9) para uma segunda calagem que deverá reduzir consideravelmente os decréscimos de produtividade das rессocas. Por outro lado, para realizar esse cálculo, é necessário considerar o decréscimo de produtividade que naturalmente ocorre em plantios comerciais, conforme modelo anteriormente ajustado (Eq. 1). Dessa forma, para calcular a demanda de Ca e de Mg para os três cultivos, fixa-se a produtividade esperada para a segunda rессoca, que deverá ser, no mínimo, a mesma da primeira rессoca, considerando-se, daí em diante, os decréscimos sucessivos de produtividade.

A expectativa teórica é de que, com a segunda calagem, haja um ganho efetivo de produtividade na quarta rессoca de 36,8 %, considerando uma produtividade esperada para cana planta de 100 t ha^{-1} e uma produtividade para segunda rессoca semelhante à primeira.

A estimativa da demanda de Ca e de Mg para a primeira e a segunda calagem sugerida é obtida ajustando-se os dados dos Quadros 8 e 9 em modelos contínuos que relacionam demanda de Ca e de Mg com a produtividade esperada (Quadro 10).

Quadro 8. Demanda de cálcio e magnésio para formação de colmos (C), de folhas (F) e de raízes (R) em cana planta, colmos (C) e folhas (F) em cana soca e primeira rессoca para diferentes produtividades de colmos frescos (PDE), considerando a ciclagem dos nutrientes e a incorporação de resíduos

Cana planta						Cana soca					Primeira rессoca						
PDE	C(-)	IR(+) ⁽¹⁾	F(-)	CF(+) ⁽²⁾	R(-)	PDE ⁽³⁾	C(-)	IR(+)	F(-)	CF(+)	PDE ⁽⁴⁾	C(-)	IR(+)	F(-)	CF(+)	DT ⁽⁵⁾ (-)	
t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹					t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹					
Demanda de Ca																	
20	11,4	0,0	12,9	0,6	1,5	13,6	5,7	1,1	6,5	1,6	11,2	4,7	0,6	5,3	0,9	43,2	
40	24,1	0,0	27,3	1,4	3,0	27,1	12,0	2,4	13,7	3,4	22,5	9,8	1,2	11,1	1,9	90,7	
60	38,5	0,0	43,2	2,2	4,5	40,7	18,7	3,8	21,7	5,4	33,7	15,2	1,9	17,5	3,1	142,9	
80	54,6	0,0	61,2	3,1	6,0	54,2	26,0	5,5	30,7	7,6	45,0	20,9	2,6	24,5	4,3	200,8	
100	73,3	0,0	81,6	4,1	7,5	67,8	34,0	7,3	40,9	10,2	56,2	27,1	3,4	32,1	5,7	265,8	
120	94,6	0,0	104,9	5,2	9,0	81,3	42,7	9,5	52,5	13,1	67,5	33,8	4,3	40,6	7,2	338,8	
140	119,9	0,0	131,8	6,6	10,5	94,9	52,4	12,0	65,8	16,5	78,7	41,0	5,2	50,2	9,1	422,2	
160	149,8	0,0	162,0	8,1	12,0	108,5	63,0	15,0	81,1	20,2	90,0	48,8	6,3	60,8	11,1	516,8	
180	185,2	0,0	198,6	9,9	13,5	122,0	74,9	18,5	99,6	24,9	101,2	57,3	7,5	72,6	13,6	627,3	
200	229,4	0,0	242,4	12,1	15,0	135,6	88,2	22,9	121,2	30,3	112,5	66,5	8,8	86,1	16,4	758,3	
Demanda de Mg																	
20	7,2	0,0	4,2	0,2	0,7	13,6	5,8	0,7	2,8	0,5	11,2	4,8	0,6	2,3	0,4	25,4	
40	15,5	0,0	9,0	0,4	1,5	27,1	12,1	1,5	5,8	1,2	22,5	9,9	1,2	4,7	0,8	53,4	
60	25,2	0,0	14,6	0,7	2,2	40,7	18,9	2,5	9,2	2,0	33,7	15,4	1,9	7,4	1,3	84,5	
80	36,6	0,0	21,0	1,0	3,0	54,2	26,4	3,7	12,9	2,7	45,0	21,2	2,6	10,3	1,8	123,0	
100	50,2	0,0	28,7	1,4	3,7	67,8	34,6	5,0	17,1	3,7	56,2	27,6	3,5	13,5	2,4	159,4	
120	66,7	0,0	37,9	1,9	4,5	81,3	43,5	6,7	21,8	4,9	67,5	34,4	4,3	17,0	3,0	205,0	
140	87,1	0,0	49,0	2,4	5,2	94,9	53,4	8,7	27,1	6,2	78,7	41,7	5,3	20,8	3,7	258,0	
160	113,3	0,0	63,0	3,1	6,0	108,5	64,4	11,3	33,1	7,9	90,0	49,8	6,4	25,1	4,5	321,5	
180	147,5	0,0	80,9	4,0	6,7	122,0	76,6	14,7	40,2	10,1	101,2	58,4	7,7	29,8	5,5	398,1	
200	195,3	0,0	104,9	5,2	7,5	135,6	90,6	19,5	48,3	12,9	112,5	67,9	9,1	35,1	6,5	496,4	

⁽¹⁾ Suprimento de Ca e de Mg proveniente da incorporação de resíduos (IR); ⁽²⁾ Suprimento de Ca e de Mg proveniente da ciclagem de folha (CF); ⁽³⁾ 67,8 % da produtividade esperada de colmos frescos da cana planta; ⁽⁴⁾ 83,0 % da produtividade esperada de colmos frescos da cana soca; ⁽⁵⁾ Demanda total de Ca e de Mg para os três cultivos sucessivos: cana planta, soca e primeira rессoca.

Quadro 9. Demanda de cálcio e magnésio para formação de colmos (C) e folhas (F) em ressorcas para diferentes produtividades de colmos frescos para a segunda ressorca (PDE), considerando a ciclagem de nutrientes e a incorporação de resíduos

Segunda ressorca					Terceira ressorca					Quarta ressorca					DT ⁽⁵⁾ (-)	
PDE	C(-)	IR(+) ⁽¹⁾	F(-)	CF(+) ⁽²⁾	FDE ⁽³⁾	C(-)	IR(+)	F(-)	CF(+)	FDE ⁽⁴⁾	C(-)	IR(+)	F(-)	CF(+)		
t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹					
Demanda de Ca																
11,2	4,7	0,5	5,3	0,8	10,9	4,6	0,5	5,2	0,8	10,4	4,4	0,5	4,9	0,7	26,1	
22,5	9,8	1,0	11,1	1,6	21,9	9,5	1,0	10,8	1,6	20,9	9,0	0,9	10,3	1,6	52,8	
33,7	15,2	1,5	17,5	2,6	32,8	14,7	1,5	16,9	2,5	31,3	14,0	1,5	16,1	2,5	82,3	
45,0	20,9	2,1	24,5	3,6	43,8	20,3	2,1	23,6	3,6	41,8	19,2	2,0	22,4	3,5	114,0	
56,2	27,1	2,7	32,1	4,8	54,7	26,3	2,7	31,0	4,7	52,2	24,9	2,6	29,3	4,6	148,6	
67,5	33,8	3,4	40,6	6,1	65,6	32,7	3,4	39,2	6,1	62,6	30,9	3,3	36,8	5,7	186,0	
78,5	41,0	4,1	50,2	7,5	76,6	39,6	4,1	48,3	7,4	73,1	37,3	4,0	45,1	7,0	227,4	
90,0	48,8	4,9	60,8	9,1	87,5	47,0	4,9	58,3	9,0	83,5	44,2	4,7	54,5	8,5	272,5	
101,2	57,3	5,7	72,6	10,9	98,5	55,1	5,7	69,7	10,8	94,0	51,5	5,5	64,8	10,2	322,2	
112,5	66,5	6,6	86,1	12,9	109,4	63,9	6,6	82,5	12,7	104,4	59,7	6,4	76,3	12,0	377,8	
Demanda de Mg																
11,2	4,8	0,5	2,3	0,3	10,9	4,6	0,5	2,2	0,3	10,4	4,4	0,5	2,1	0,3	18,0	
22,5	9,9	1,0	4,7	0,7	21,9	9,6	1,0	4,6	0,7	20,9	9,1	1,0	4,4	0,7	37,2	
33,7	15,4	1,5	7,4	1,1	32,8	14,9	1,5	7,2	1,1	31,3	14,2	1,5	6,8	1,0	58,2	
45,0	21,2	2,1	10,3	1,5	43,8	20,6	2,1	10,0	1,5	41,8	19,5	2,1	9,4	1,5	80,2	
56,2	27,6	2,8	13,5	2,0	54,7	26,7	2,8	13,0	1,9	52,2	25,2	2,7	12,3	1,9	104,2	
67,5	34,4	3,4	17,0	2,5	65,6	33,2	3,4	16,4	2,5	62,6	31,4	3,3	15,4	2,4	130,3	
78,5	41,7	4,2	20,8	3,1	76,6	40,3	4,2	20,1	3,1	73,1	38,0	4,0	18,8	2,9	158,2	
90,0	49,8	5,0	25,1	3,7	87,5	47,9	5,0	24,1	3,7	83,5	45,0	4,8	22,6	3,5	188,8	
101,2	58,4	5,9	29,8	4,5	98,5	56,2	5,9	28,6	4,4	94,0	52,7	5,6	26,7	4,2	221,9	
112,5	67,9	6,8	35,1	5,2	109,4	65,3	6,8	33,6	5,2	104,4	61,0	6,5	31,2	5,0	258,6	

⁽¹⁾ Suprimento de Ca e de Mg proveniente da incorporação de resíduos (IR); ⁽²⁾ Suprimento de Ca e de Mg proveniente da ciclagem de folha (CF); ⁽³⁾ 97,3 % da produtividade esperada de colmos frescos da segunda ressorca; ⁽⁴⁾ 95,4 % da produtividade esperada de colmos frescos da terceira ressorca;

⁽⁵⁾ Demanda total de Ca e de Mg para os três cultivos sucessivos.

Quadro 10. Demanda de Ca e de Mg para a primeira e segunda calagem (kg ha⁻¹) em função da produtividade esperada em cana planta e segunda ressoca (t ha⁻¹), considerando a ciclagem de nutrientes e a incorporação de resíduos

Equação	R ²
Primeira calagem ⁽¹⁾	
$\hat{Y}_{Ca} = 22,21 + 1,1745^{**}X + 0,0123^{**}X^2$	0,999
$\hat{Y}_{Mg} = 21,82 + 0,3714^0 X + 0,0097^{**} X^2$	0,998
Segunda calagem ⁽²⁾	
$\hat{Y}_{Ca} = 6,45 + 1,7444^{**} W + 0,0137^{**} W^2$	0,999
$\hat{Y}_{Mg} = 3,08 + 1,3243^{**} W + 0,0083^{**} W^2$	0,999

⁽¹⁾ Para $\forall X \leq 20$ e ≥ 200 t ha⁻¹, substituem-se estas produtividades nas regressões e obtêm-se as demandas para a primeira calagem; ⁽²⁾ Para $\forall W \leq 11,2$ e $\geq 112,5$ t ha⁻¹, substituem-se estas produtividades nas regressões e obtêm-se as demandas para a segunda calagem.

⁰ e ^{**} Significativos a 10 e a 1 %, respectivamente.

Sendo a demanda função da produtividade, ela diminui consideravelmente com os ciclos sucessivos e, especificamente, no caso do Ca e do Mg, pode-se considerar uma demanda de implantação e outra de manutenção (Figura 5), representadas, respectivamente, pela quantidade necessária para assegurar a produtividade da cana planta até a primeira ressoca (demanda de implantação) e outra representada pela quantidade necessária para garantir a produtividade da segunda ressoca até a quarta (demanda de manutenção).

A demanda de implantação é maior que a de manutenção, o que era de se esperar. Porém, especificamente no caso da cana-de-açúcar, as relações do Ca com o Mg mostraram-se variáveis tanto com o aumento da produtividade como com os ciclos sucessivos. A demanda de implantação de Ca é maior do que a de Mg em baixas e médias produtividades, reduzindo-se em altas produtividades, o que faz com que a relação Ca:Mg diminua com o aumento da produtividade. Em manutenção, porém, esta relação Ca:Mg é mais estreita e se mantém praticamente constante em baixas, médias e altas produtividades (Figura 5). Por exemplo, para uma

produtividade de 50 t ha⁻¹ na fase de implantação, a demanda estimada de Ca é de 111,7 kg ha⁻¹ e a de Mg de 64,6 kg ha⁻¹, com uma relação de 1,7:1. Para uma produtividade de 140 t ha⁻¹, a demanda de Ca é de 427,7 kg ha⁻¹ e a de Mg é de 263,9 kg ha⁻¹, com uma relação de demanda de 1,6:1, estreitando-se, portanto, com o aumento de produtividade. No entanto, na fase de manutenção para uma produtividade de 30 t ha⁻¹, as demandas de Ca e Mg são, respectivamente, de 71,1 e 50,3 kg ha⁻¹, com uma relação de 1,4:1. Para se manter nesta fase uma produtividade de 90 t ha⁻¹, essas demandas são, respectivamente, de 274,4 e 189,5 kg ha⁻¹, com uma relação de 1,4:1.

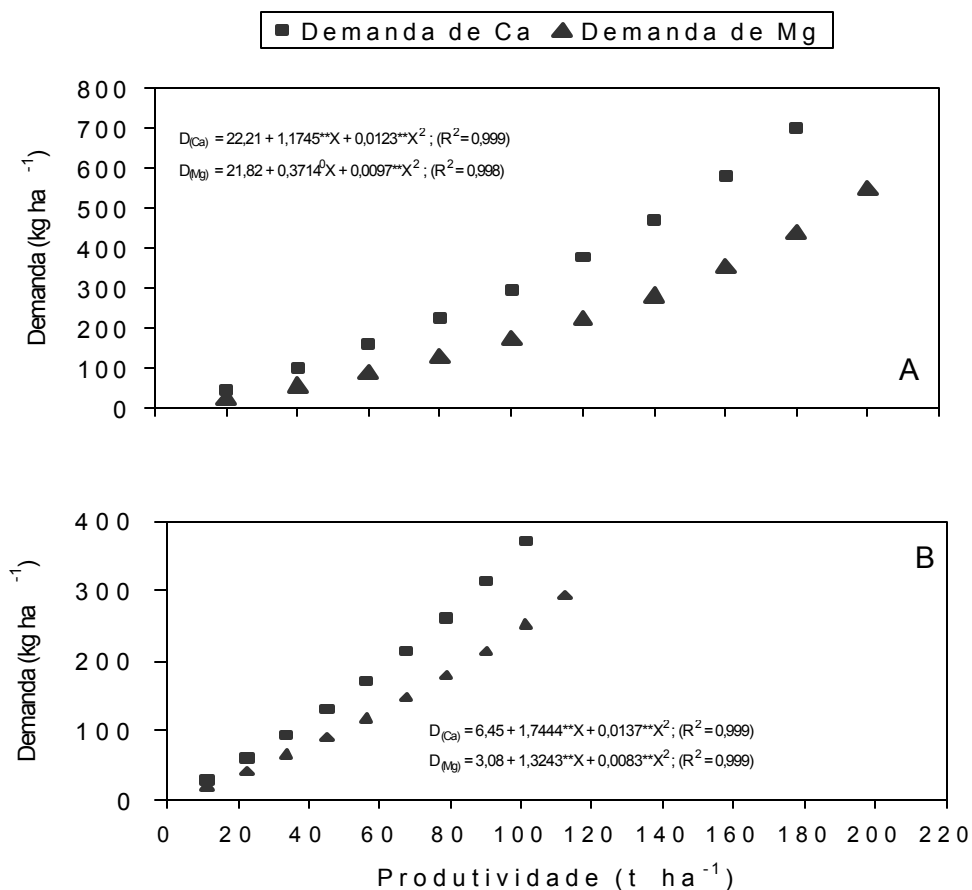


Figura 5. Demanda de Ca e de Mg de implantação (A) e de manutenção (B) em função da produtividade esperada de cana-de-ácúcar.

É relativamente vasta a informação sobre o maior acúmulo de Ca em relação ao de Mg em cana-de-açúcar (CORDEIRO, 1978; ZAMBELLO JÚNIOR & ORLANDO FILHO, 1981; RODELLA et al., 1984; BENEDINI, 1988), sendo mais evidente em baixas e médias produtividades, onde a relação da demanda Ca:Mg se amplia, como exemplificado, anteriormente.

É provável que essa diferença de demanda em diferentes produtividades se reflita em níveis críticos de Mg até superiores aos de Ca, dependendo da capacidade da cana absorver mais um do que outro, conforme será visto, posteriormente. Esta constatação de altas demandas de Mg em canas de quarto corte em diante precisa ser comprovada.

4.1.3. Taxa de recuperação de cálcio e de magnésio pela planta

Dados de CHAVES SOLERA (1988) sugerem que a taxa de recuperação de Ca e Mg pela cana-de-açúcar varia entre 35 e 50 % para Ca e 50 e 70 % para Mg. Com isso, ajustaram-se modelos que permitem, a partir da taxa de recuperação, calcular as doses a serem adicionadas ao solo, para satisfazer o suprimento requerido por determinadas demandas (Quadro 11).

Por se tratar de cátions trocáveis, a taxa de recuperação destes nutrientes independe da capacidade tampão do solo, o que significa que as plantas recuperam a mesma quantidade aplicada em solos de alta ou de baixa capacidade tampão. Os dados de CHAVES SOLERA (1988), por terem sido obtidos em casa de vegetação, estão, provavelmente, subestimando a taxa de recuperação de Mg e, principalmente, de Ca, quando se considera que as raízes ficam, neste caso, restritas à exploração de um pequeno volume de solo durante um curto espaço de tempo, mesmo utilizando-se doses mais elevadas do que em campo. No campo, o volume de solo explorado pelas raízes é maior e, conseqüentemente, a absorção também deverá ser. No entanto, futuras versões do SBNR-C poderão dispor de dados que propiciem um melhor ajuste para estimar esta taxa de recuperação.

Quadro 11. Taxa de recuperação de cálcio e magnésio ($\text{kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$) pela cana-de-açúcar em função da dose aplicada (kg ha^{-1})

Equação ⁽¹⁾	R ²
$\hat{Y}_{\text{Ca}} = 0,48 - 0,0002^{**}X, \forall X \text{ entre } 30 \text{ e } 1.000 \text{ kg ha}^{-1}$	0,886
$\hat{Y}_{\text{Mg}} = 0,68 - 0,0004^{**}X, \forall X \text{ entre } 21 \text{ e } 700 \text{ kg ha}^{-1}$	0,891

⁽¹⁾ Para doses fora do intervalo das equações, substituem-se os limites indicados nas regressões e obtêm-se as taxas de recuperação.

** Significativo a 1 %.

4.1.4. Disponibilidade de cálcio e de magnésio

Para avaliar a disponibilidade de Ca e de Mg, o SBNR-C precisa da análise do solo e considera como método de extração para cátions trocáveis o do KCl 1,0 mol L⁻¹.

Transforma-se o resultado da análise em kg ha^{-1} , considerando para o cultivo da cana que o calcário será aplicado a lanço em área total e incorporado de 0 até 30 cm de profundidade. Dados de INFORZATO & ALVAREZ (1957), justificam uma incorporação de corretivo mais profunda em cana-de-açúcar, pois a maior concentração de raízes foi encontrada nos primeiros 30 cm, com uma média de 59,3 %. A capacidade do Sistema radicular da cana explorar camadas mais profundas do solo, aliado ao maior controle da acidez exercido pelo calcário, provavelmente proporcionará ganhos de produtividade e um aumento na disponibilidade de outros nutrientes.

O resultado da análise do solo fornece apenas uma indicação do disponível (trocável), tornando-se necessário conhecer quanto de Ca e de Mg o extrator de KCl 1,0 mol L⁻¹ é capaz de recuperar em função da quantidade aplicada destes nutrientes. Para isso, ajustou-se um modelo que relaciona a recuperação de Ca e de Mg pelo extrator KCl 1,0 mol L⁻¹ em função da quantidade aplicada dos mesmos (Figura 6).

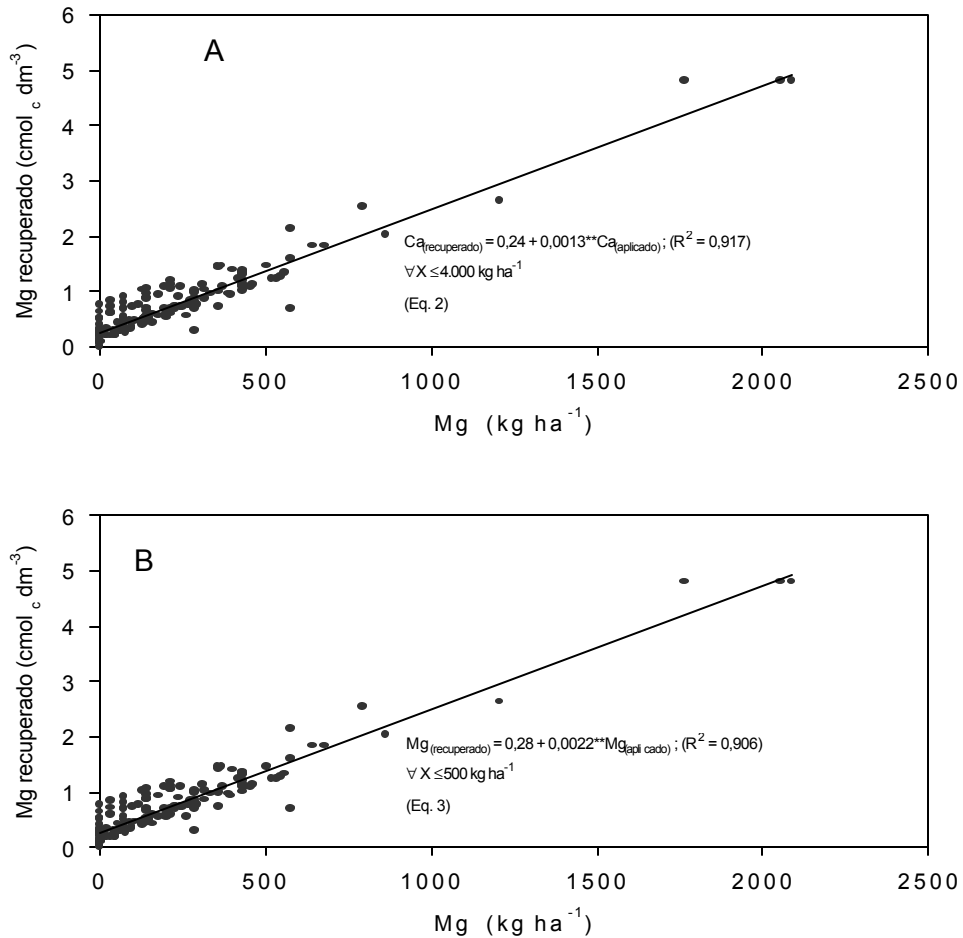


Figura 6. Teores de cálcio (A) e de magnésio (B) recuperados pelo extrator KCl 1,0 mol L⁻¹ em amostras de diferentes solos, em função das doses de destes nutrientes aplicadas ao solo.

Para Ca, os dados para o ajuste do modelo foram obtidos dos trabalhos de PORTELA (1984), SILVA (1986), LOUZADA (1987), GARCIA (1991), MENDONÇA (1992) e FREITAS (1998). Para o Mg, os dados foram obtidos dos trabalhos de PORTELA (1984), SILVA (1986), LOUZADA (1987), MARTINS (1988), GARCIA (1991), ALCOFORADO (1992) e FREITAS (1998).

A linearidade do modelo ajustado é consistente até 4.000 kg ha⁻¹ de Ca aplicado e até 500 kg ha⁻¹ de Mg, pela maior concentração de pontos nesta região do gráfico.

Esses números (Figura 6) são essenciais quando se quer conhecer o nível crítico destes nutrientes no solo para uma determinada produtividade esperada, como se verá posteriormente. Por outro lado, na análise de um solo em que não se aplicou Ca e, ou, Mg, para estimar a quantidade originalmente disponível e possibilitar o cálculo do suprimento do solo para estes nutrientes, essas funções são, também de grande importância. Por exemplo, se em uma análise de solo encontrou-se $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca e $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Mg, significa que a disponibilidade do solo para estes nutrientes equivale à adição de 769 kg ha^{-1} de Ca e de 227 kg ha^{-1} de Mg, considerando-se a taxa de recuperação, pelos extratores, dos nutrientes aplicados.

4.1.5. Calagem

Os métodos mais utilizados para estimar a necessidade de calagem são basicamente três: o da saturação por bases, o da neutralização do alumínio e elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis e o mais utilizado no Nordeste, em que o critério para neutralização do Al trocável, ou elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis, é utilizado exclusivamente, e o maior valor obtido representa a recomendação da necessidade de calagem.

O SBNR-C, apesar de tratar a calagem de forma diferente dos critérios adotados, como se verá adiante, proporcionará ao usuário a opção de utilizar como método de recomendação qualquer um dos critérios apresentados.

4.1.5.1. Método da saturação por bases

Neste método, o cálculo da necessidade de calagem é dado pela expressão:

$$NC = T (Ve - Va) / 100$$

em que NC é necessidade de calagem, em tha^{-1} ; T é a CTC a pH 7, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Va é a saturação por bases atual do solo, em %; Ve é a saturação por bases desejada ou esperada, que no caso da cana-de-açúcar é de 60% (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996).

4.1.5.2. Método da neutralização do alumínio trocável e elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis

A necessidade de calagem é assim calculada:

$$NC = Y [Al^{3+} - (m_t \times t/100)] + [X - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que NC é a necessidade de calagem, em tha^{-1} ; Y é um índice da capacidade tampão da acidez do solo que pode ser estimado pelo teor de argila ou pelo valor do P-rem; Al^{3+} é a acidez trocável dada pela análise do solo, em $cmol_c dm^{-3}$; m_t representa a máxima saturação por alumínio tolerada pela cultura que no caso da cana-de-açúcar é de 30 % (ALVAREZ V. & RIBEIRO, 1999); t é a CTC efetiva, em $cmol_c dm^{-3}$; X é a correção da deficiência de Ca e de Mg, assegurando um teor mínimo destes nutrientes que, para cana-de-açúcar, é de 3,5, segundo recomendações dos mesmos autores; Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores trocáveis destes nutrientes dados pela análise de solo, em $cmol_c dm^{-3}$.

O valor do índice da capacidade tampão da acidez (Y) é função do teor de argila do solo e pode ser estimado pelo modelo contínuo (ALVAREZ V. & RIBEIRO, 1999):

$$\hat{Y} = 0,0302 + 0,06532 X - 0,000257 X^2; (R^2 = 0,999)$$

em que \hat{Y} é um índice da capacidade tampão da acidez do solo; X é o teor de argila (%).

Ainda, segundo os mesmos autores, o valor de Y pode ser estimado, também, de forma contínua em função do P-rem, conforme modelo:

$$\hat{Y} = 4,002 - 0,125901 X + 0,001205 X^2 - 0,00000362 X^3; (R^2 = 0,999)$$

em que \hat{Y} é um índice da capacidade tampão da acidez do solo; X é o valor do P-rem ($mg L^{-1}$).

4.1.5.3. Método da neutralização do alumínio trocável ou da elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis

Este é o método mais difundido nas regiões produtoras de cana-de-açúcar do Nordeste, cujo princípio básico é a separação da necessidade de calagem para neutralizar os teores de alumínio trocável ou para elevar os teores trocáveis de Ca e Mg. O maior valor encontrado representa a recomendação de calagem (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998).

O cálculo da necessidade de calagem é dado pelas expressões:

$$NC = f \times Al^{3+} \text{ ou } NC = f \times [2 - (Ca^{2+} + Mg^{2+})]$$

em que NC é necessidade de calagem, em tha^{-1} ; f é o fator de calagem que pode ser 1,5, 2,0 ou 2,5 para solos com teores de argila < 15, 15 a 35 e > 35 %, respectivamente; Al trocável, em $cmol_c dm^{-3}$; 2 é o nível crítico de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ do solo considerado ideal; Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores trocáveis destes nutrientes dados pela análise de solo, em $cmol_c dm^{-3}$.

4.1.5.4. Método proposto pelo SBNR-C

Diante do fato de que os resultados experimentais demonstram uma maior resposta da cana-de-açúcar ao fornecimento de Ca e Mg em relação a correção da acidez, foi possível desenvolver um método para recomendação de Ca e Mg dentro de uma filosofia de balanço nutricional no Sistema solo-planta, em que o pH e a capacidade tampão do solo são de fundamental importância. O nível crítico da saturação por alumínio é o índice utilizado no modelo para correção da acidez. Portanto, o presente método tem por objetivo desenvolver um modelo para recomendação de Ca e Mg para diferentes produtividades esperadas e condições de acidez, considerando a tolerância da cultura aos teores de Al trocável. Este é, portanto, um método em que há a preocupação com a produtividade esperada, diferentemente dos outros métodos anteriormente descritos.

Após a estimativa da demanda nutricional de Ca e de Mg para uma dada produtividade, seja para a primeira ou segunda calagem, calcula-se quanto de Ca e de Mg é necessário aplicar no solo.

Conhecendo-se qual é a quantidade de Ca e Mg a aplicar para atender as demandas nutricionais de um cultivo sucessivo de cana planta, soca e primeira rессoca (primeira calagem) ou segunda, terceira e quarta rессoca (segunda calagem), transforma-se esta quantidade em CaO e MgO a aplicar, em kg ha⁻¹.

$$\text{CaO} = 1,40 \times \text{Ca} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\text{MgO} = 1,66 \times \text{Mg} \quad (\text{Eq. 5})$$

Para estimar qual a variação no pH do solo decorrente da quantidade recomendada para atender as demandas nutricionais da cultura, ajustou-se um modelo com diferentes solos, que relaciona a variação no valor do pH por tonelada de calcário aplicada em função de uma medida da capacidade tampão da acidez (teor de H + Al).

A acidez potencial (H + Al) é uma análise de uso comum nos laboratórios de fertilidade do País, podendo ser determinada pelo método do acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7 ou estimada por meio do pH SMP (QUAGGIO, 1983b; RAIJ et al., 1987; SOUZA et al., 1989; PEREIRA et al., 1998; ESCOSTEGUY & BISSANI, 1999; NASCIMENTO, 2000). Assim, ajustou-se um modelo que relaciona a variação no valor do pH do solo por tonelada de calcário aplicado em função da acidez potencial (Figura 7). Os dados utilizados para o ajuste deste modelo são dos trabalhos de PITA (1974), BORGES (1982) e FREITAS (1998). Esse ajuste mostrou uma certa inconsistência em solos em que a acidez potencial é baixa. Todavia, é um modelo de grande utilidade prática, pois irá indicar qual o pH final do solo pela aplicação do calcário adotando-se qualquer método de determinação da necessidade de calcário. A indicação do pH final do solo para cada critério proporcionará uma tomada mais criteriosa de decisão de qual será o melhor método a utilizar para recomendar calcário em cana-de-açúcar.

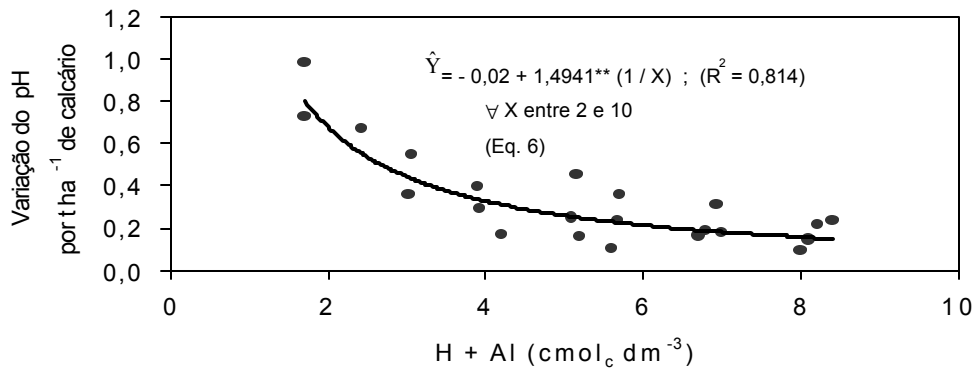


Figura 7. Variação no valor do pH do solo por t ha^{-1} de calcário aplicado em função da acidez potencial de diferentes solos.

Sabendo-se qual a variação no pH do solo decorrente da aplicação de calcário para atender as demandas nutricionais da cultura, o SBNR-C calcula qual será o pH final esperado:

$$\text{pH final esperado} = \text{pH inicial do solo} + \text{variação do pH}$$

Considerando a tolerância da cana-de-açúcar à acidez do solo, alguns trabalhos (IAA/PLANALSUCAR, 1980; MARINHO & ALBUQUERQUE, 1983; RODELLA et al., 1984) mostram que o nível de tolerância à saturação por alumínio encontra-se em torno de 30 %. Desse modo, ajustou-se um modelo que relaciona a saturação por alumínio (m) ao pH do solo utilizando dados de QUAGGIO (1983a) (Figura 8).

Diante da estimativa do pH final esperado decorrente da aplicação de calcário para atender as demandas nutricionais em Ca e em Mg da cana-de-açúcar para uma dada produtividade esperada, estima-se, por meio desta regressão, qual será a redução na saturação por alumínio do solo decorrente da quantidade de calcário recomendada. Quando o pH final a ser atingido pela aplicação de calcário para atender as demandas nutricionais não proporcionar uma saturação por alumínio de 30 % ou menor, estima-se qual deve ser este pH e calcula-se qual deve ser a

variação de pH, estimando-se qual será a quantidade de calcário adicional para corrigir a acidez do solo.

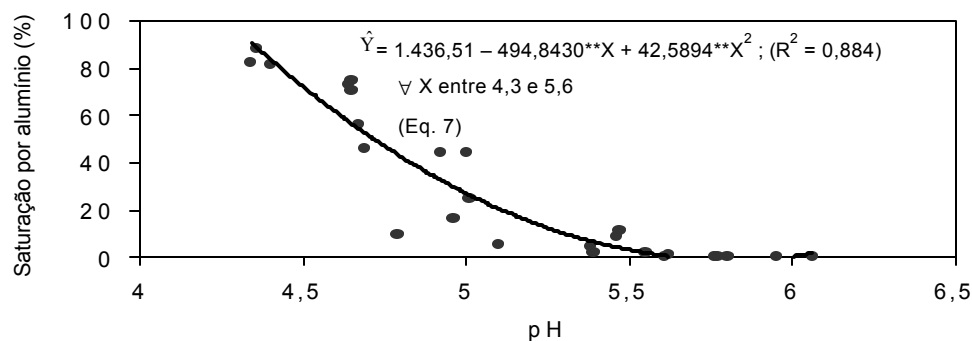


Figura 8. Saturação por alumínio em função do pH em amostras de diferentes solos.

Para exemplificar, imagine-se que o pH final atingido com a quantidade de calcário recomendada para atender as demandas de Ca e de Mg foi de 4,8. Isto significa que a saturação por alumínio estimada é de, aproximadamente, 43 %, ou seja, acima do nível tolerado pela cana que é de 30 %. Portanto, para esta tolerância, estima-se qual deve ser o pH final a ser atingido, que é de, aproximadamente, 5,0. Se o pH inicial do solo era de 4,5 e com a aplicação de uma certa quantidade de calcário necessária para atender as demandas nutricionais ele passou para 4,8, então é preciso que este pH seja aumentado em mais 0,2 unidade, ou seja, é necessária, ainda, uma quantidade de calcário adicional para corrigir o pH e manter a saturação por alumínio a um nível adequado à cultura. Dessa forma, o método, em casos como estes, calcula duas quantidades de calcário que serão objetivamente diferentes. Uma irá atender as demandas nutricionais e, se não for suficiente para reduzir a saturação por alumínio a níveis tolerados pela cultura, calcula-se uma outra quantidade que corrige o Al^{3+} do solo.

Como a demanda de Ca e de Mg é estimada para três cultivos sucessivos (Quadro 10), na maioria dos casos, o calcário recomendado para atender essa demanda é suficiente para reduzir a saturação por alumínio e deixá-la abaixo dos 30 %. Apenas em solos muito tamponados e

para baixas produtividades é possível que haja necessidade de uma quantidade adicional de calcário para corrigir a acidez excessiva.

Na segunda calagem sugerida, as demandas de Ca e de Mg são bem menores, o que vai levar a recomendações de calcário também menores quando comparada à primeira calagem. No entanto, a segunda calagem, após mais de 40 meses de cultivo, é apenas para uma garantia de que o pH do solo da última ressoca não atinja valores muito aquém daqueles corrigidos inicialmente, durante o plantio da cana planta. Assim, a expectativa é de que o pH do solo antes do início da segunda ressoca (período de realização da segunda calagem) tenha tido uma pequena redução e, desta forma, pequenas recomendações de calcário poderão ser suficientes para corrigir o pH aos valores iniciais da primeira correção.

4.1.5.5. Simulação da recomendação de calcário pelo SBNR-C

A consistência prática do modelo foi avaliada pela simulação da recomendação para amostras analisadas pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (Quadro 12). Essa simulação consistiu em avaliar a quantidade de calcário recomendada para produtividades baixas, até 50 t ha^{-1} ; médias, em torno de 100 t ha^{-1} e, altas, acima de 150 t ha^{-1} de colmos. Estimou-se o pH final esperado e a saturação por alumínio decorrentes da quantidade de calcário recomendada para atender as demandas nutricionais relativas às produtividades estabelecidas, bem como o complemento de calcário necessário para corrigir a acidez do solo até o limite tolerado pela cultura.

Para exemplificar, serão utilizados os resultados da análise química do solo 8 (Quadro 12), para uma produtividade de 100 t ha^{-1} em cana planta, que corresponde à recomendação de calcário para a primeira calagem. Inicialmente, estima-se qual é a demanda nutricional de Ca e de Mg para a primeira calagem (Quadro 10):

$$\text{Demanda de Ca (100 t ha}^{-1}\text{)} = 262,7 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Demanda de Mg (100 t ha}^{-1}\text{)} = 156,0 \text{ kg ha}^{-1}$$

Quadro 12. Características químicas de amostras de solos de diversas regiões do estado de Minas Gerais, utilizadas no cálculo da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da cana-de-açúcar

Solo ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	K ⁽³⁾	Ca ²⁺ ⁽⁴⁾	Mg ²⁺ ⁽⁴⁾	Al ³⁺ ⁽⁴⁾	H + Al ⁽⁵⁾	CTC Efet.	CTC pH7	V	m	M.O. ⁽⁶⁾	P-rem ⁽⁷⁾
		mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³						%		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹
1	4,5	27,3	0,60	0,20	1,1	4,6	1,97	5,47	15,9	55,8	3,49	19,3
2	4,5	35,1	0,40	0,10	1,1	5,3	1,69	5,89	10,0	65,1	3,76	11,0
3	5,1	46,8	1,10	0,20	0,7	7,6	2,12	9,02	15,7	33,0	3,49	10,5
4	4,9	27,3	0,00	0,00	0,2	8,6	0,27	8,67	0,8	74,1	4,54	11,1
5	4,6	70,2	0,20	0,10	0,9	9,2	1,38	9,68	5,0	65,2	4,73	9,6
6	4,6	27,3	0,33	0,10	1,5	10,6	2,00	11,10	4,5	75,0	5,10	18,5
7	4,8	27,3	0,74	0,16	1,0	11,1	1,97	12,07	8,0	50,8	4,70	3,7
8	4,3	42,9	0,11	0,05	1,9	12,2	2,17	12,47	2,2	87,6	2,71	16,0
9	5,2	109,2	1,21	0,28	0,0	2,3	1,77	4,07	43,5	0,0	1,26	52,7
10	5,5	179,4	2,70	0,50	0,3	8,9	3,96	12,56	29,1	7,6	3,49	9,9

⁽¹⁾ Amostras de solos analisadas pelo laboratório de rotina do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa; ⁽²⁾ pH em água, relação 1:2,5; ⁽³⁾ Extrator Mehlich-1; ⁽⁴⁾ Extrator KCl 1,0 mol L⁻¹; ⁽⁵⁾ Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH7; ⁽⁶⁾ Método de Walkley e Black; ⁽⁷⁾ Teor de Prem na solução de equilíbrio, determinado após a agitação por uma hora da TFSA com CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P, na relação solo-solução 1:10.

Para que a planta absorva toda esta quantidade, é preciso, primeiro, estimar a taxa de recuperação dos nutrientes pela planta para que se possa calcular qual deve ser o reequerimento pela planta que equivalha a uma dose a ser aplicada (Quadro 11):

$$\text{Taxa de recuperação de Ca} = 0,43 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

$$\text{Taxa de recuperação de Mg} = 0,62 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

Dessa forma, para que a planta absorva as quantidades de Ca e Mg demandadas, o solo terá que suprir a planta de uma quantidade equivalente à dose de:

$$\text{Ca} = \frac{262,7}{0,43} = 610,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Mg} = \frac{156,0}{0,62} = 251,6 \text{ kg ha}^{-1}$$

Com essas quantidades de Ca e de Mg que o solo deveria ter, estimam-se os níveis críticos, ou seja, transformam-se as quantidades em teores, utilizando as taxas de recuperação dos nutrientes aplicados (Eq. 2 e 3):

$$\text{Nível crítico de Ca no solo} = 610,9 \times 0,0013 = 0,79 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de Mg no solo} = 251,6 \times 0,0022 = 0,55 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$$

Se no resultado da análise do solo 8 (Quadro 12), os teores de Ca e de Mg fossem muito mais elevados, significaria que o solo poderia atender toda a demanda nutricional para a produtividade de 100 t ha^{-1} . No entanto, o resultado desta análise mostra teores de 0,11 e 0,05 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca e de Mg, respectivamente.

Para calcular quanto aplicar destes nutrientes, subtrai-se do teor crítico o teor encontrado no resultado da análise do solo e divide-se pelos coeficientes angulares das regressões que estimam o recuperado pelo extrator em função do aplicado (Eq. 2 e 3):

$$\text{Ca a aplicar} = \frac{0,79 - 0,11}{0,0013} = 523 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Mg a aplicar} = \frac{0,55 - 0,05}{0,0022} = 227 \text{ kg ha}^{-1}$$

Calculadas as quantidades de Ca e de Mg, transformam-se estas quantidades em óxidos (Eq. 4 e 5):

$$\text{CaO a aplicar} = 1,40 \times 523 = 732 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{MgO a aplicar} = 1,66 \times 227 = 377 \text{ kg ha}^{-1}$$

Assim, calcula-se a relação aproximada (massa/massa) de CaO/MgO do corretivo a aplicar = 2:1.

Dessa forma, recomenda-se utilizar um calcário que apresente 26 % de CaO e 12 % de MgO ou outro com teores próximos a estes, preservando assim as demandas nutricionais em Ca e Mg da cultura.

Calcário a aplicar (quantidade a ser recomendada) = $2,8 \text{ t ha}^{-1}$, aplicado a lanço em área total e incorporado até 30 cm de profundidade com PRNT de 100 %.

Conhecendo então, a quantidade de calcário necessária para atender as demandas nutricionais em Ca e Mg para cana planta, soca e primeira ressoça (primeira calagem), estima-se a variação do pH para aquela quantidade. Como o resultado da análise do solo 8 (Quadro 12) mostra que o teor de $\text{H}^+ \text{ Al}$ é de $12,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, utilizando a Eq. 6, estima-se a variação no pH, ou seja, o ΔpH por t ha^{-1} de calcário é 0,13. Isso significa que para cada tonelada de calcário aplicada neste solo, o pH irá variar em apenas 0,13 unidade. Se a quantidade de calcário recomendada é $2,8 \text{ t ha}^{-1}$, o incremento no pH proporcionado pela quantidade de calcário calculada será:

$$\Delta\text{pH} = 2,8 \text{ t ha}^{-1} \times 0,13 \text{ unidade de pH/t ha}^{-1} \cong 0,4 \text{ unidade de pH}$$

Conhecendo-se o pH inicial do solo, calcula-se o incremento de pH decorrente da quantidade de calcário recomendada. Assim, como o pH inicial é de 4,3, o pH esperado para esta recomendação será:

$$\text{pH (calcário da demanda nutricional)} = 4,3 + 0,4 = 4,7$$

A saturação por alumínio decorrente do novo pH é estimada em função do pH (Eq. 7):

$$\text{Saturação por alumínio (pH 4,7)} = 51,5 \%$$

Como a saturação por alumínio inicial do solo era de 87,6 %, a quantidade de calcário recomendada só conseguiria reduzir esta saturação para 51,5 %. Isto significa que se terá de complementar a recomendação de calcário para corrigir a saturação por alumínio até o limite tolerado pela cultura, que é de 30 %. Para isto, estima-se qual é o pH para a saturação de 30 % (Eq. 7):

$$\text{pH (30\% de saturação por alumínio)} \cong 5,0$$

Como o pH variou apenas de 4,3 para 4,7 com o calcário recomendado, o incremento no pH para que a saturação por alumínio se reduza para 30 % será de pH 4,7 a pH 5,0, portanto, um $\Delta\text{pH} = 0,3$.

Como neste solo para cada t ha^{-1} de calcário há um incremento de 0,13 unidade de pH (Eq. 6), então a quantidade de calcário para corrigir a saturação por alumínio para o limite tolerado será de:

Calcário a aplicar (corrigir a acidez) = $0,3/0,13 = 2,3 \text{ t ha}^{-1}$
aplicado a lanço em área total e incorporado até
30 cm de profundidade com PRNT de 100 %.

Assim, a recomendação final é composta pelo calcário a aplicar para atender a demanda nutricional ($2,8 \text{ t ha}^{-1}$) mais o calcário para corrigir a acidez ($2,3 \text{ t ha}^{-1}$), dando uma recomendação de $5,1 \text{ t ha}^{-1}$.

É provável que em solos muito tamponados como este, a realização de uma segunda calagem seja dispensável. No entanto, considerando que haja ao final dos ciclos da cana planta, soca e ressoca uma redução de 20% nas unidades de pH que foram incrementadas quando do início da correção, o pH que era de 5,0 reduziria-se para 4,8, fazendo com que, neste solo, houvesse a necessidade de uma aplicação de $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário numa segunda calagem, mantendo na segunda ressoca o mesmo nível de produtividade da primeira.

As recomendações de calcário para as produtividades esperadas de 50 e 150 t ha^{-1} para todos os demais solos (Quadro 12), estão representadas no quadro 13.

A simulação mostrou que a quantidade de calcário para atender as demandas nutricionais foi, para todos os solos, suficiente para reduzir para menos de 30 % a saturação por alumínio, principalmente para altas produtividades esperadas (150 t ha^{-1}). Isto se deve ao fato de considerar-se quantidades de Ca e de Mg suficientes para o cultivo sucessivo de cana planta, soca e ressoca (primeira calagem).

Quadro 13. Recomendação de calcário pelo SBNR-C para solos com diferentes características químicas

Solo	pH inicial	m inicial	PDE ⁽¹⁾	Calcário dem. nut. ⁽²⁾	Relação CaO/MgO ⁽³⁾	pH esp. ⁽⁴⁾	m esp. ⁽⁵⁾	Calcário corr. acid.	Calcário recom. ⁽⁶⁾
		%	t ha ⁻¹				%	t ha ⁻¹	
1	4,5	55,8	50	0,0	2:1	4,5	72,1	1,7	1,7 ⁽⁷⁾
1	4,5	55,8	100	0,8	2:1	4,7	51,5	1,0	1,8
1	4,5	55,8	150	4,2	2:1	5,8	0,0	0,0	4,2
2	4,5	65,1	50	0,0	2:1	4,5	72,1	1,9	1,9 ⁽⁸⁾
2	4,5	65,1	100	1,6	2:1	4,9	34,3	0,4	2,0
2	4,5	65,1	150	5,0	2:1	5,8	0,0	0,0	5,0
3	5,1	33,0	50	0,0	2:1	5,1	20,6	0,0	0,0
3	5,1	33,0	100	0,0	2:1	5,1	20,6	0,0	0,0
3	5,1	33,0	150	2,1	2:1	5,5	3,2	0,0	2,1
4	4,9	74,1	50	1,3	2:1	5,1	20,6	0,0	1,3
4	4,9	74,1	100	3,3	2:1	5,4	6,3	0,0	3,3
4	4,9	74,1	150	6,7	2:1	5,9	0,0	0,0	6,7
5	4,6	65,2	50	0,5	2:1	4,7	51,5	2,1	2,6
5	4,6	65,2	100	2,4	2:1	4,9	34,3	0,7	3,1
5	4,6	65,2	150	5,9	2:1	5,4	6,3	0,0	5,9
6	4,6	75,0	50	0,0	2:1	4,6	61,4	3,1	3,1 ⁽⁸⁾
6	4,6	75,0	100	1,9	2:1	4,8	42,5	1,5	3,4
6	4,6	75,0	150	5,3	2:1	5,3	10,2	0,0	5,3
7	4,8	50,8	50	0,0	2:1	4,8	42,5	1,5	1,5 ⁽⁹⁾
7	4,8	50,8	100	0,2	2:1	4,8	42,5	1,5	1,7
7	4,8	50,8	150	3,6	2:1	5,3	10,2	0,0	3,6
8	4,3	87,6	50	0,9	2:1	4,4	83,7	4,6	5,5
8	4,3	87,6	100	2,8	2:1	4,7	51,5	2,3	5,1
8	4,3	87,6	150	6,2	2:1	5,1	20,6	0,0	6,2
9	5,2	0,0	50	0,0	2:1	5,2	14,9	0,0	0,0
9	5,2	0,0	100	0,0	2:1	5,2	14,9	0,0	0,0
9	5,2	0,0	150	1,7	2:1	6,3	0,0	0,0	1,7
10	5,5	7,6	50	0,0	2:1	5,5	3,2	0,0	0,0
10	5,5	7,6	100	0,0	2:1	5,5	3,2	0,0	0,0
10	5,5	7,6	150	0,0	2:1	5,5	3,2	0,0	0,0

⁽¹⁾ Produtividades esperadas em cana planta; ⁽²⁾ Quando a demanda em Mg não for atendida, recomenda-se utilizar outra fonte, como MgSO₄; ⁽³⁾ Relação aproximada (massa/massa) do corretivo a aplicar; ⁽⁴⁾ e ⁽⁵⁾ Valores estimados por meio das equações 6 e 7; ⁽⁶⁾ Calcário dolomítico com 26 % de CaO e 12% MgO; ⁽⁷⁾, ⁽⁸⁾ e ⁽⁹⁾: Utilizar um calcário com apenas 1 %, 5 % e 3 % de MgO, respectivamente.

Para solos mais tamponados, como o 5, 6, 7 e 8, as quantidades de calcário recomendadas para atender as demandas nutricionais em baixas e médias produtividades não são suficientes para reduzir a saturação por alumínio, sendo necessário um complemento de calcário com o objetivo de corrigir a acidez em excesso. O solo 4, medianamente tamponado, com elevada saturação por alumínio, porém sem Ca e Mg disponíveis, a quantidade de calcário calculada para atender a demanda nutricional para os três níveis de produtividade simulados é crescente e fundamentalmente dependente da produção desejada.

Solos pouco tamponados, como 1, 2 e 3, porém com teores de Ca relativamente altos são capazes de suprir a demanda deste nutriente, principalmente para baixas produtividades. No entanto, para o calcário recomendado para corrigir a acidez e para atender a demanda de Mg, cuja disponibilidade no solo é pequena, recomenda-se utilizar um calcário com um teor mínimo de MgO, como para os solos 1 e 2. No solo 3, não se recomenda calcário para baixas e médias produtividades; no entanto, para satisfazer a demanda de Mg, recomenda-se utilizar outra fonte deste nutriente, como $MgSO_4$.

Para solos extremamente arenosos, de baixo poder tampão, elevados teores disponíveis de Ca e de Mg e pH superior a 5,0, como é o caso do solo 9, não se recomenda calcário para produtividades maiores que 150 t ha^{-1} , pois o pH final esperado deverá ser muito superior a 6,0 (Quadro 13) e a recomendação de $1,7\text{ t ha}^{-1}$ para atender a demanda nutricional para produtividades em torno de 150 t ha^{-1} de colmos, já eleva o pH para 6,3, comprometendo todo o equilíbrio químico do solo, tornando indisponíveis outros nutrientes. Solos com estas características, portanto, não sustentam produtividades elevadas se a fonte para atender a demanda de Ca e de Mg for calcário.

O solo 10, argiloso, medianamente tamponado, com altos teores de Ca disponível e elevado pH, mas com teores de Mg bem inferiores aos de Ca, é também um solo em que não se recomenda calcário. No entanto, para que neste solo se possam esperar produtividades superiores a 100 t ha^{-1} , é necessária a aplicação de Mg de outra fonte, como $MgSO_4$.

Essas discussões são importantes para que se possam tomar decisões para cada situação em particular, tornando a recomendação de corretivos em cana-de-açúcar uma prática coerente, baseada, prioritariamente, na demanda nutricional de Ca e de Mg para diferentes produtividades esperadas.

Outro aspecto importante diz respeito ao estimador da capacidade tampão da acidez. Considera-se como estimador desta capacidade o teor de H + Al por ter sido a característica do solo que apresentou modelo de melhor ajuste. O P-rem e o teor de argila não se mostraram bons estimadores da capacidade tampão da acidez pela falta de dados que representassem todo o intervalo de variação destas características. Futuras versões certamente poderão ajustar modelos mais consistentes. No entanto, para os solos 1 e 6, que têm praticamente o mesmo valor de P-rem (Quadro 12), para uma mesma quantidade de calcário recomendada não deveria haver mudança no pH dos mesmos, pois seriam solos de mesma capacidade tampão (considerando o P-rem como estimador desta capacidade). Por outro lado, com a acidez potencial como estimadora da capacidade tampão, no solo 6, para cada tonelada de calcário aplicada, há uma variação estimada de 0,13 unidade de pH, enquanto que no solo 1 esta variação é de 0,30 unidade. A variação é 2,5 vezes maior para um solo onde o teor de H + Al é 2,3 vezes menor.

Da mesma forma, para o grupo de solos 2, 3 e 4, se o P-rem fosse o estimador da capacidade tampão da acidez não se esperariam mudanças no pH inicial para uma mesma quantidade de calcário recomendada, pois são solos de mesma capacidade tampão. O modelo proposto pelo SBNR-C, no entanto, estima variações que vão de 0,26 unidade de pH no solo 2 a 0,15 unidade no solo 4, por tonelada de calcário aplicada.

Por outro lado, foram os solos 9 e 10 que apresentaram valores extremos de P-rem, coincidindo também com valores bem diferenciados de acidez potencial, encontrando-se uma maior variação do pH no solo, provavelmente arenoso (solo 9) e uma menor variação no solo provavelmente argiloso (solo 10).

A necessidade do ajuste de um modelo onde o P-rem seja considerado como estimador da capacidade tampão da acidez em futuras

versões do SBNR-C poderá mostrar-se consistente o suficiente para explicar porque solos que apresentaram o mesmo valor para esta característica mostraram uma variação considerável em seu valor final de pH esperado para uma mesma quantidade de calcário recomendada. Por outro lado, o teor de argila como estimador da capacidade tampão da acidez apresenta dificuldade prática relevante por não ser uma análise de rotina nos laboratórios de rotina de fertilidade do solo.

O ajuste do modelo que considera o teor de H^+ Al como estimador da capacidade tampão mostrou-se, nesta primeira versão, muito consistente, além de apresentar boa capacidade preditiva, tanto em valores extremos de acidez, como em intermediários.

O SBNR-C foi comparado com os métodos da saturação por bases, neutralização do Al trocável e elevação dos teores de Ca e Mg e o método excludente entre a neutralização do Al trocável ou elevação dos teores de Ca e de Mg (Quadro 14), com o objetivo de testar sua consistência prática. Como o modelo recomenda quantidade de calcário e os demais métodos necessidade de calagem, é preciso distinguir estes dois conceitos. A necessidade de calagem só corresponde a quantidade de calcário quando satisfaz basicamente três condições: a) o calcário é aplicado a lanço em área total, ou seja, toda a superfície do terreno é coberta na calagem; b) o calcário é incorporado até 20 cm de profundidade; c) o PRNT é de 100 %.

Como a recomendação do SBNR-C é para aplicação a lanço em área total, incorporação até 30 cm de profundidade e para um calcário com PRNT de 100 %, é necessário, para comparar a recomendação por este Sistema com a dos demais métodos, transformar a necessidade de calagem calculada pelos diferentes critérios em quantidade de calcário. Se a única diferença é que em cana a incorporação deve ser até 30 cm de profundidade, multiplicou-se a necessidade de calagem calculada pelos métodos por 1,5.

O SBNR-C mostrou-se consistente por recomendar calcário de forma contínua para qualquer produtividade, permitindo que a recomendação apresente um inter-relacionamento mais amplo com o sistema solo-planta e torne-se mais universalizada.

Quadro 14. Quantidade de calcário para solos com diferentes características químicas e estimativa do pH final esperado

Solo	Recomend. SBNR-C ⁽¹⁾	pH esp.	Recomend. Sat. por bases ⁽²⁾	pH esp.	Recomend. Neut. Al e elev. Ca e Mg ⁽³⁾	pH esp.	Recomend. Mét. alternat. ⁽⁴⁾	pH esp.
	t ha ⁻¹		t ha ⁻¹		t ha ⁻¹		t ha ⁻¹	
1	4,2	5,8	3,6	5,6	5,6	6,2	4,5	5,8
2	5,0	5,8	4,4	5,6	6,9	6,3	5,6	6,0
3	2,1	5,5	6,0	6,1	3,6	5,7	2,6	5,5
4	6,7	5,9	7,7	6,0	5,7	5,8	7,5	6,0
5	5,9	5,4	8,0	5,7	6,9	5,6	6,4	5,5
6	5,3	5,3	9,2	5,7	7,4	5,5	5,9	5,3
7	3,6	5,3	9,4	5,8	6,1	5,5	4,1	5,2
8	6,2	5,1	10,8	5,4	9,3	5,2	7,1	5,0
9	1,7	6,3	1,0	5,8	3,0	7,1	1,1	5,9
10	0,0	5,5	5,8	6,3	0,4	5,6	1,1	5,7
Média	4,1	5,6	6,6	5,8	5,5	5,8	4,6	5,6

⁽¹⁾ Recomendações de calcário para produtividades esperadas de 150 t ha⁻¹; ⁽²⁾ Método da saturação por bases (ALVAREZ V. & RIBEIRO, 1999), sem referência quanto à produtividade esperada; ⁽³⁾ Método da neutralização do Al trocável e da elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis (ALVAREZ V. & RIBEIRO, 1999), sem referência quanto à produtividade esperada; ⁽⁴⁾ Método alternativo entre a neutralização do Al trocável ou elevação dos teores de Ca e Mg trocáveis (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998).

Para todos os dez solos estudados nesta simulação ficou evidente que os critérios mais utilizados no País para recomendar calcário em cana provavelmente estão superestimando as recomendações. Produtividades de até 100 t ha⁻¹ podem ser obtidas, em média, com aproximadamente 3,0 t ha⁻¹ de calcário (Quadro 13). Os três critérios recomendam, em média, entretanto, aproximadamente 5,5 t ha⁻¹. Em regiões onde o cultivo de cana é realizado por uma agricultura de baixo “input”, pode estar ocorrendo desperdício de corretivo.

Por outro lado, o pH final esperado tem se mostrado apropriado, ficando na maioria dos casos acima de 5,5 e abaixo de 6,0. Entretanto, especificamente no caso da cana, não há necessidade de valores de pH acima de 5,0, pois trata-se de uma cultura tolerante a níveis mais elevados de saturação por alumínio. Talvez esta seja a causa provável das elevadas

recomendações de calcário dos critérios estudados. É possível que saturações por base de 60 % e limites críticos de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ de $3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ estejam superestimando as recomendações de calcário pelo método de saturação por bases e neutralização do Al trocável e elevação dos teores de Ca e Mg do solo, respectivamente.

O método alternativo recomenda, em média, menos calcário que os demais. Como na região Nordeste, as produtividades esperadas estão em torno de 75 t ha^{-1} (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998), este critério parece adequado quando empregado para aquela região.

O SBNR-C, entretanto, disponibilizará para pesquisadores, agricultores e usuários todos os critérios utilizados para recomendar calcário para cana-de-açúcar, proporcionando a estimativa do pH final obtido para a recomendação, o que possibilitará tomada de decisão quanto ao critério a utilizar em uma determinada situação.

4.2. Desenvolvimento do Sistema para potássio

4.2.1. Estimativa do CUB de potássio

Para estimar o CUB de K, foi desenvolvido um modelo contínuo para colmo e folhas de cana planta e soca (Quadro 15). Os dados utilizados para o ajuste deste modelo, que relaciona CUB com produtividade em cana planta e soca, de colmos e folhas, foram obtidos do trabalho de ORLANDO FILHO (1978). O CUB de raiz para K foi obtido partindo-se do princípio de que as relações entre Ca e K na matéria seca da parte aérea de plantas de cana-de-açúcar são mantidas também nas raízes. Assim, conhecendo-se o CUB de Ca nas raízes da planta, pode-se estimar o CUB de K.

O trabalho de ORLANDO FILHO (1978) mostra que o conteúdo de K na parte aérea da cana é o dobro do de Ca. Considerando que estas relações serão mantidas nas raízes, então, como o CUB de Ca é de 800 kg kg^{-1} , o de K será de 400 kg de matéria seca de raízes produzidas por kg deste nutriente acumulado.

Quadro 15. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de K (kg kg^{-1}) em função da produção de matéria seca de colmos, folhas e raízes de cana planta e soca (t ha^{-1})

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 440,80 - 4,7870^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha^{-1} $\hat{Y} = 417, \forall X \leq 5 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 201, \forall X \geq 50 \text{ t ha}^{-1}$	0,973
• Folhas	$\hat{Y} = 242,13 - 4,0891^{**} X$; $\forall X$ entre 3,2 e 32 t ha^{-1} $\hat{Y} = 229, \forall X \leq 3,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 111, \forall X \geq 32 \text{ t ha}^{-1}$	0,909
• Raízes	$\hat{Y} = \bar{Y} = 400$	-
Cana soca		
• Colmo	$\hat{Y} = 262,52 - 2,8620^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1} $\hat{Y} = 253, \forall X \leq 3,4 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 165, \forall X \geq 33,9 \text{ t ha}^{-1}$	0,905
• Folhas	$\hat{Y} = 128,38 - 4,1676^{**} X$; $\forall X$ entre 2,2 e 21,7 t ha^{-1} $\hat{Y} = 119, \forall X \leq 2,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 38, \forall X \geq 21,7 \text{ t ha}^{-1}$	0,891

** Significativo a 1 %.

4.2.2. Demanda de potássio

A cultura da cana-de-açúcar acumula mais K do que qualquer outro nutriente (Quadro 3), sendo esse acúmulo ainda mais pronunciado em cana soca do que em cana planta, mesmo quando se considera que há um decréscimo de produtividade na soca. No caso específico das ressocas, como não se dispõe de funções que relacionem CUB de K com produtividade, a demanda nutricional é estimada utilizando-se as mesmas funções da soca.

A expectativa teórica é de que não ocorra um decréscimo significativo no CUB das ressocas, levando a crer que a demanda por K em ressocas

seja menor do que em cana soca, pelo decréscimo natural de produtividade em cultivos sucessivos.

A peculiaridade do elevado acúmulo de K em cana soca acompanhado por uma diminuição considerável no CUB (Quadro 15), faz com que a demanda por este nutriente seja mais elevada do que em cana planta, mesmo havendo um decréscimo de produtividade entre estes dois cultivos. Este decréscimo no CUB parece não ocorrer em ressocas, fazendo com que a demanda por K diminua gradualmente com os decréscimos de produtividade. Portanto, sugere-se que a demanda de K seja diferenciada para cada cultivo, ou seja, cana planta, cana soca e ressocas (Quadro 16).

Dados futuros que relacionem CUB de K e produtividade em ressocas poderão elucidar essa expectativa; porém, até o momento, é provável que a diferenciação da demanda nutricional de K em cada cultivo seja o caminho mais lógico e próximo da realidade, particularmente por se tratar de um nutriente que se acumula em quantidade diferenciada entre cultivos sucessivos.

Em produtividades para cana planta a partir de 120 t ha^{-1} , a demanda de K é mais alta nos colmos, superando a de cana soca. Por outro lado, em ressocas a demanda de K é, em média, aproximadamente 60 % daquela calculada para cana soca. Assim, quando se utilizam recomendações de K em ressocas semelhantes às aquelas aplicadas em cana soca, é provável que se esteja superestimando as reais necessidades de K em cultivos de ressoça e, conseqüentemente, poderá estar havendo desperdício de fertilizante potássico.

A estimativa da demanda de K para os cultivos de cana planta, soca e ressoça sugerida é obtida ajustando-se os dados do quadro 16 em modelos contínuos que relacionam demanda de K e produtividade esperada (Quadro 17).

Quadro 16. Demanda de K para formação de colmos (C), de folhas (F) e de raízes (R) em cana planta e colmos (C) e folhas (F) em cana soca e ressorcas para diferentes produtividades esperadas de colmos frescos para cana planta (PDE), considerando a ciclagem de nutrientes e incorporação de resíduos

FDE	Cana planta						Cana soca						Ressorca							
	C(-)	IR(+) ⁽¹⁾	F(-)	CF(+) ⁽²⁾	R(-)	DT ⁽³⁾ (-)	FDE ⁽⁴⁾	C(-)	IR(+)	F(-)	CF(+)	DT ⁽⁵⁾ (-)	FDE ⁽⁶⁾	C(-)	IR(+)	F(-)	CF(+)	DT ⁽⁷⁾ (-)		
t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹						t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹						t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹					
20	12,0	1,0	14,0	1,4	3,0	26,6	13,6	13,4	1,2	18,2	3,5	26,9	10,1	9,9	1,3	13,2	2,5	19,3		
40	25,4	2,3	29,6	3,0	6,0	55,7	27,1	27,9	2,5	39,4	7,5	57,3	20,1	20,3	2,8	35,0	5,6	46,9		
60	40,6	3,1	47,3	4,7	9,0	89,0	40,7	43,6	4,1	64,4	12,0	91,9	30,2	31,3	4,4	44,7	8,6	63,0		
80	58,0	4,3	67,4	6,7	12,0	126,3	54,2	60,5	5,8	94,3	17,2	131,8	40,3	43,0	6,1	63,8	12,6	88,1		
100	77,9	5,6	90,4	9,0	15,0	168,7	67,8	79,2	7,8	130,7	23,3	178,8	50,3	55,7	7,9	84,7	17,3	115,2		
120	101,0	6,9	117,1	11,7	18,0	217,5	81,3	99,7	10,1	175,9	30,6	234,9	60,4	68,9	10,0	109,8	23,1	145,6		
140	128,2	8,3	149,3	14,9	21,0	275,2	94,9	121,7	12,8	233,7	39,4	303,2	70,5	83,1	12,2	139,3	30,4	179,8		
160	160,6	9,8	186,9	18,7	24,0	343,1	108,5	146,5	16,1	309,8	50,3	389,9	80,5	98,2	14,6	171,7	39,6	215,7		
180	200,0	11,4	232,3	23,2	27,0	424,7	122,0	174,3	20,0	415,3	64,0	505,6	90,6	114,4	17,4	213,2	52,2	258,0		
200	248,8	13,2	288,3	28,8	30,0	525,1	135,6	205,4	24,9	570,8	82,2	669,1	100,7	132,5	20,5	264,1	70,3	305,8		

⁽¹⁾ Suprimento de K proveniente da incorporação de resíduos (IR); ⁽²⁾ Suprimento de K proveniente da ciclagem de folha (CF); ⁽³⁾ Total da demanda nutricional de K para cana planta; ⁽⁴⁾ 67,8 % da produtividade esperada de colmos frescos da cana planta; ⁽⁵⁾ Total da demanda nutricional de K para cana soca; ⁽⁶⁾ 74,2 % da produtividade esperada de colmos frescos da cana soca, considerando a média de produtividade de todas as ressorcas; ⁽⁷⁾ Total da demanda de K para qualquer que seja a ressorca.

A demanda de K, diferentemente do que ocorre com o Ca e o com o Mg, aumenta na soca e diminui na ressoça, o que impossibilita estabelecer demandas de implantação e manutenção.

Especificamente no caso do K, a variação de demandas nutricionais em baixas, médias e altas produtividades em cultivos de cana planta, soca e ressoça mostra que o K é um nutriente com elevada tendência a apresentar consumo de luxo, principalmente por apresentar alta demanda em cana soca e ressoças com pouca conversão em aumento de produtividade. Considerando uma produtividade de 50 t ha⁻¹ em cana soca e 40 t ha⁻¹ em ressoça, as demandas de K são, respectivamente, de 103,4 e 86,6 kg ha⁻¹ (Quadro 17). Essas demandas mostram que recomendações de fertilizantes potássicos em cana soca não podem ser extrapoladas para ressoças como vem sendo praticado em todas as tabelas de recomendação de fertilizantes para cana-de-açúcar no País.

Quadro 17. Demanda de K para os cultivos de cana planta, soca e ressoças (kg ha⁻¹) em função da produtividade esperada (t ha⁻¹), considerando a ciclagem de nutrientes e a incorporação de resíduos

Equação	R ²
Cana planta ⁽¹⁾	
$\hat{Y} = 21,47 + 0,4074 * X + 0,0103 ** X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha ⁻¹	0,999
Cana soca	
$\hat{Y} = 47,95 - 0,8057 X + 0,0383 ** X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha ⁻¹	0,994
Ressoça	
$\hat{Y} = 9,08 + 1,2889 ** X + 0,0162 ** X^2$; $\forall X$ entre 10,1 e 100,7 t ha ⁻¹	0,999

⁽¹⁾ Para $\forall X \leq 20$ e ≥ 200 t ha⁻¹, substituem-se estas produtividades na regressão e obtêm-se as respectivas demandas. Em soca e ressoças, para produtividades fora do intervalo representado nas regressões, procede-se como para cana planta.

* e ** Significativos a 5 e a 1 %, respectivamente.

4.2.3. Taxa de recuperação de potássio pela planta

Dados de CORDEIRO (1978) sugerem que a taxa de recuperação de K pela cana-de-açúcar para diferentes doses de K aplicadas ao solo, varia entre 70 e 85 %. Assim, dentro deste intervalo de recuperação, ajustou-se um modelo, conforme a equação:

$$\hat{Y} = 0,82 - 0,0002**X ; (R^2 = 0,815) \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\forall X \text{ entre } 35 \text{ e } 900 \text{ kg ha}^{-1}$$

em que \hat{Y} é a taxa de recuperação de K ($\text{kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$). Para doses aplicadas fora do intervalo da equação, substituem-se os limites indicados na regressão e obtém-se a taxa de recuperação de K; X é a dose de K aplicada ao solo (kg ha^{-1}).

4.2.4. Disponibilidade de potássio

Para avaliar a disponibilidade de K, considera-se como método de extração o Mehlich-1 (MEHLICH, 1953).

Como o resultado da análise do solo é a expressão de uma fração do disponível, é necessário conhecer o que o Mehlich-1 pode recuperar de K na análise do solo em função de uma determinada quantidade aplicada deste nutriente. Para isso, ajustou-se um modelo que relaciona a recuperação de K pelo Mehlich-1 em função da quantidade aplicada (Figura 9), considerando que um hectare tem $3.000.000 \text{ dm}^{-3}$.

Os dados para o ajuste do modelo foram obtidos dos trabalhos de PREZOTTI (1985) e MORAIS (1999). Esses trabalhos diferem basicamente nas maiores doses aplicadas. Enquanto PREZOTTI (1985) chegou a 100 mg dm^{-3} em sua maior dose, encontrando sempre ajustes lineares para seus dados, MORAIS (1999) vai até 450 mg dm^{-3} .

Por acreditar que, na prática, os modelos lineares são os que mais se aplicam a fenômenos desta natureza, especialmente por não se utilizarem doses elevadas como as utilizadas por MORAIS (1999), considera-se que a linearidade do modelo ajustado é consistente até 600 kg ha^{-1} de K aplicado.

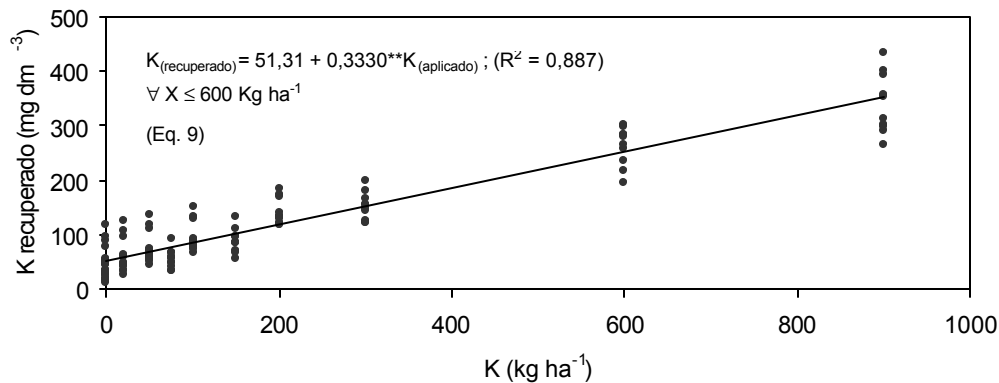


Figura 9. Recuperação de K em amostras de diferentes solos pelo Mehlich-1 como função do K aplicado.

4.2.5. Adubação potássica

Se por um lado muitas outras culturas não respondem à adubação potássica, o cultivo da cana apresenta respostas importantes à aplicação deste nutriente (MARINHO et al., 1975; ESPIRONELO et al., 1981; ALVAREZ et al., 1991). Em cana soca, as recomendações são elevadas e próximas das quantidades recomendadas em cana planta. Isto significa que, aparentemente, não há efeito residual para o K aplicado no plantio, o que pode ser explicado pela natureza catiônica deste nutriente, fazendo com que ele não se acumule como resíduo. Assim, se as demandas são elevadas e não há efeito residual, as recomendações de fertilizantes potássicos em rebrotas também serão.

Para simular como se recomendaria K em cana-de-açúcar, serão utilizados resultados das análises de 10 solos (Quadro 12). A simulação da recomendação consistiu em avaliar a quantidade a ser recomendada de K para produtividades baixas, até 50 t ha⁻¹; médias, em torno de 100 t ha⁻¹ e, altas, acima de 120 t ha⁻¹ de colmos.

No exemplo, toma-se como produtividade esperada em cana planta 120 t ha⁻¹ de colmos. Isto significa que as produções esperadas em soca e ressecas serão de, respectivamente, 81,4 e 60,4 t ha⁻¹, conforme modelo discutido anteriormente (Eq. 1). Inicialmente, estimam-se as demandas de K em cana planta, soca e ressecas (Quadro 17):

$$\text{Demanda de K em cana planta (120 t ha}^{-1}\text{)} = 218,7 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Demanda de K em cana soca (81,4 t ha}^{-1}\text{)} = 236,1 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Demanda de K em ressoca (60,4 t ha}^{-1}\text{)} = 146,0 \text{ kg ha}^{-1}$$

Para que as plantas possam absorver estas quantidades, é preciso conhecer a quantidade que o solo deveria ter (Requerimento pela planta). Para isso, é necessário estimar a taxa de recuperação do nutriente pela planta (Eq. 8):

$$\text{Taxa de recuperação de K para cana planta} = 0,78 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

$$\text{Taxa de recuperação de K para cana soca} = 0,77 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

$$\text{Taxa de recuperação de K para ressoca} = 0,79 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

Dessa forma, para que a planta absorva a quantidade demandada para a produtividade esperada, o solo terá de receber uma dose de K correspondente a:

$$\text{K para cana planta} = \frac{218,7}{0,78} = 280,4 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{K para cana soca} = \frac{236,1}{0,77} = 306,6 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{K para ressoca} = \frac{146,0}{0,79} = 184,8 \text{ kg ha}^{-1}$$

Com estas quantidades de K que deveria ter o solo, estimam-se os níveis críticos utilizando-se a taxa de recuperação pelo extrator do K aplicado (Eq. 9):

$$\text{Nível crítico de K para cana planta} = 280,4 \times 0,3330 = 93,4 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de K para cana soca} = 306,6 \times 0,3330 = 102,1 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de K para ressocas} = 184,8 \times 0,3330 = 61,5 \text{ mg dm}^{-3}$$

Para calcular qual a dose recomendável de K, subtrai-se do teor crítico o teor encontrado no resultado da análise do solo e divide pela taxa

de recuperação do extrator que estima o recuperado na análise em função do aplicado (Eq. 9).

Considerando que o resultado da análise do solo 3 (Quadro 12), corresponde a amostragens realizadas tanto antes do plantio da cana como antes das rebrotas de soca e ressocas, calculam-se as doses recomendáveis para estes três diferentes cultivos:

$$\text{Dose recomendável de K para planta} = \frac{93,4 - 46,8}{0,3330} = 139,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Dose recomendável de K para soca} = \frac{102,1 - 46,8}{0,3330} = 166,1 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Dose recomendável de K para ressoca} = \frac{61,5 - 46,8}{0,3330} = 44,1 \text{ kg ha}^{-1}$$

As doses recomendáveis de K em cana planta, soca e ressocas, assim como os níveis críticos para as produtividades esperadas de 50 e 120 t ha⁻¹ em cana planta para o solo 3 e os demais solos (Quadro 12), estão representadas no quadro 18.

Para baixas e médias produtividades, os níveis críticos de K em cana planta e soca se equivalem, mesmo em socas que apresentam uma redução de produção em torno de 30% em relação a cana planta, demonstrando a alta demanda por K das socarias.

Esses elevados níveis críticos, tanto em cana planta como em soca para altas produtividades, propiciam em solos de baixo e médio teor de K disponível altas doses recomendadas. É possível que estas elevadas doses sejam devido, também, ao elevado consumo de luxo deste nutriente, ou seja, a planta apresenta altas demandas e pouca conversão em aumentos consideráveis de produtividade.

Isto não significa que as recomendações obtidas sejam inconsistentes para K em altas produtividades esperadas, pois a tabela de recomendação de São Paulo (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996) recomenda para produtividades de 150 t ha⁻¹, doses de 166 kg ha⁻¹ de K.

Quadro 18. Níveis críticos e doses recomendadas de K para cana planta, soca e ressorcas pelo SBNR-C em solos com diferentes características químicas

Solo ⁽¹⁾	PDE ⁽²⁾	NCR ⁽³⁾			Dose de K ⁽⁴⁾		
		Planta	Soca	Ressorca	Planta	Soca	Ressorca
	t ha ⁻¹	mg dm ⁻³			kg ha ⁻¹		
1	50	27,8	26,5	21,2	1,5	0,0	0,0
1	100	69,6	71,4	47,8	127,0	132,4	61,6
1	120	93,4	102,1	61,5	198,5	224,6	102,7
2	50	27,8	26,5	21,2	0,0	0,0	0,0
2	100	69,6	71,4	47,8	103,6	109,0	38,1
2	120	93,4	102,1	61,5	175,1	201,2	79,3
3	50	27,8	26,5	21,2	0,0	0,0	0,0
3	100	69,6	71,4	47,8	68,5	73,9	3,0
3	120	93,4	102,1	61,5	139,9	166,1	44,1
5	50	27,8	26,5	21,2	0,0	0,0	0,0
5	100	69,6	71,4	47,8	0,0	2,7	0,0
5	120	93,4	102,1	61,5	69,7	95,8	0,0
8	50	27,8	26,5	21,2	0,0	0,0	0,0
8	100	69,6	71,4	47,8	80,2	85,6	14,7
8	120	93,4	102,1	61,5	151,7	177,8	55,8
9	50	27,8	26,5	21,2	0,0	0,0	0,0
9	100	69,6	71,4	47,8	0,0	0,0	0,0
9	120	93,4	102,1	61,5	0,0	0,0	0,0
10	50	27,8	26,5	21,2	0,0	0,0	0,0
10	100	69,6	71,4	47,8	0,0	0,0	0,0
10	120	93,4	102,1	61,5	0,0	0,0	0,0

⁽¹⁾ Os solos 4, 6 e 7 cujos resultados das análises encontram-se no quadro 12 não foram utilizados na simulação da recomendação de K por apresentarem os mesmos teores de K que o solo 1;

⁽²⁾ Produtividade esperada em cana planta. Em cana soca, a produtividade esperada deverá ser 67,8 % da cana planta e em ressorcas espera-se uma produtividade de 74,2 % da cana soca;

⁽³⁾ Nível crítico de K no solo em cana planta, soca e ressorcas; ⁽⁴⁾ Dose de K a ser aplicada localizadamente no sulco de plantio ou ao lado das linhas da soca e ressorcas.

Outro aspecto importante neste estudo de balanço de nutrientes é que os níveis críticos e as doses recomendáveis de K em ressorcas mostram-se coerentes com as doses recomendadas em cana planta e soca, diferenciando-se, principalmente deste último cultivo, o que não prevê nenhuma tabela de recomendação de cana-de-açúcar no País. Pela importância da contribuição das ressorcas para a produção de cana, é possível que haja uma lacuna da pesquisa para este tipo de cultivo como, por exemplo, estabelecer níveis críticos diferenciados como foi feito nesta primeira versão.

Em Pernambuco (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998), as doses recomendáveis de K são menores tanto em cana planta como em soca, quando comparadas às recomendações do SBNR-C e das tabelas de recomendação de São Paulo e Minas Gerais (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996; RECOMENDAÇÕES PARA USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS, 1999). É possível que naquela região a maior presença de minerais do tipo 2:1 em solos menos intemperizados representem uma fonte considerável de K, fazendo com que as respostas às adubações potássicas tornem-se menos expressivas.

4.3. Desenvolvimento do Sistema para fósforo, enxofre e zinco

4.3.1. Estimativa dos CUB de fósforo, de enxofre e de zinco

Por apresentar um comportamento diferenciado no Sistema solo-planta, a estimativa dos CUB de P, de S e de Zn não depende apenas da produtividade, como no caso dos cátions trocáveis. É função, também, da capacidade tampão que pode ser estimada por meio do teor de argila ou do valor do P-rem. Considera-se que há uma variação do CUB com a capacidade tampão do solo, ou seja, a expectativa é a de que em solos arenosos ou menos intemperizados (de menor capacidade tampão) o CUB seja menor e que em solos argilosos intemperizados (de maior capacidade tampão), o CUB seja maior. Por exemplo, plantas em ambientes mais restritivos à absorção de P, utilizam mais eficientemente este nutriente e,

ou, apresentam maior restrição ao crescimento por limitação na disponibilidade do nutriente.

Para que se possa modelar o CUB de P, considerando a produtividade e o poder tampão do solo, é preciso estimar, primeiro, o CUB em função da produtividade (Quadro 19) em colmos, folhas e raízes de cana planta e soca.

Os dados utilizados para ajustar os modelos que relacionam CUB em função da produtividade para folhas, colmos e raízes em cana planta e soca foram obtidos dos trabalhos de ORLANDO FILHO (1978) e PENATTI (1991).

Não foram possíveis ajustes curvilineares decrescentes, como também ocorreu com os nutrientes Ca, Mg e K, em que os modelos ajustados foram lineares.

Considerando que a produtividade da cana-de-açúcar diminui gradualmente com os ciclos sucessivos (CARVALHO & GRAÇA, 1976; RIVERA PINEDA, 1994), podendo chegar a, aproximadamente, 30 % entre o primeiro e o segundo corte, como se discutiu anteriormente (Eq. 1), os dados mostram que os CUB em cana planta são maiores do que em soca, indicando um considerável acúmulo de P em socarias de cana-de-açúcar.

Nesta primeira versão, considera-se que as funções da soca serão as mesmas da ressoca por falta de dados que permitam o ajuste de modelos em cultivos sucessivos. Portanto, é provável que os CUB da ressoca estejam subestimados e superestimem as reais necessidades de P. No entanto, versões futuras poderão corrigir estas deficiências e, conseqüentemente, aumentar a consistência dos modelos.

Quadro 19. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de P (kg kg⁻¹) em função da produção de matéria seca de colmos, folhas e raízes de cana planta e soca (t ha⁻¹)

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 2.399,49 - 26,7432^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha ⁻¹ $\hat{Y} = 2.266, \forall X \leq 5$ t ha ⁻¹ e $\hat{Y} = 1.062, \forall X \geq 50$ t ha ⁻¹	0,871
• Folhas	$\hat{Y} = 1.457,10 - 18,3566^{**} X$; $\forall X$ entre 3,2 e 32 t ha ⁻¹ $\hat{Y} = 1.398, \forall X \leq 3,2$ t ha ⁻¹ e $\hat{Y} = 870, \forall X \geq 32$ t ha ⁻¹	0,979
• Raízes	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2.500$	-
Cana soca		
• Colmo	$\hat{Y} = 1.099,23 - 7,9610^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha ⁻¹ $\hat{Y} = 1.072, \forall X \leq 3,4$ t ha ⁻¹ e $\hat{Y} = 829, \forall X \geq 33,9$ t ha ⁻¹	0,809
• Folhas	$\hat{Y} = 1.031,13 - 19,5922^{**} X$; $\forall X$ entre 2,2 e 21,7 t ha ⁻¹ $\hat{Y} = 989, \forall X \leq 2,2$ t ha ⁻¹ e $\hat{Y} = 606, \forall X \geq 21,7$ t ha ⁻¹	0,843

** Significativo a 1 %.

Para estimar o CUB de P em função do poder tampão de fosfatos do solo é preciso considerar o ajuste da planta para utilizar o P que é posto à sua disposição, sendo função da maior ou menor competição entre planta e solo pelo P aplicado como fertilizante (NOVAIS & SMYTH, 1999). No entanto, dados experimentais disponíveis só permitiram o ajuste de um modelo do CUB em função do teor de argila (PENATTI, 1991; SILVA, 1991):

$$\hat{Y} = 691,58 + 13,0046^{**} X ; (R^2 = 0,775) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\forall X \text{ entre } 5 \text{ e } 75 \% \text{ de argila}$$

em que \hat{Y} é o CUB de P (kg kg⁻¹). Para solos com teores de argila fora do intervalo da equação, substituem-se os valores limites indicados e obtêm-se os respectivos valores do CUB; X é o teor de argila (%).

Considerando-se que o teor de argila não é um bom estimador da capacidade tampão de P, uma vez que capacidade tampão depende não somente da quantidade de argila mas, também, da sua qualidade (ALVAREZ V., 1982), ajustou-se um outro modelo que relaciona P-rem em função do teor de argila (Figura 10).

Os dados utilizados para o ajuste deste modelo foram os de DELAZARI (1979), FONSECA (1987), GUSS (1988), SILVA (1990), MELLO (1991), VIÉGAS (1991), DIAS (1992), FERNÁNDEZ ROJAS (1992), RODRIGUES (1993), CAMPELLO (1993), SILVA (1995), VILLANI (1995), FREIRE (1996), RIVAS YUPANQUI (1997), FERREIRA (1998), FREITAS (1998), OLIVEIRA (1998) e ROLIM (1998).

Assim, como o valor do P-rem tem permitido estimar, com vantagem em relação à textura, a capacidade tampão de P em diferentes solos (NOVAIS, 1977; ALVAREZ V., 1982; BAHIA FILHO, 1982; MUNIZ, 1983; NEVES, 1983; ALVAREZ V. & FONSECA, 1990), foi possível modelar, por meio dos ajustes das Eq. 10 e 11, uma equação que relaciona CUB em função do P-rem:

$$\hat{Y} = 1.689,03 - 22,0519^{**} X + 0,0935^{**} X^2 ; (R^2 = 0,747) \quad (\text{Eq. 12})$$

$\forall X$ entre 8 e 48 mg L⁻¹

em que \hat{Y} é o CUB de P (kg kg⁻¹). Para estimar o CUB fora do intervalo da regressão substituem-se os valores limites indicados e obtêm-se os respectivos valores do CUB; X é o P-rem (mg L⁻¹).

Com a regressão que relaciona CUB com P-rem (CUB_{solo}), pode-se, então, corrigir o CUB, estimando-se o CUB de P corrigido (CUB_{corrigido}) a partir do CUB para uma determinada produtividade esperada (CUB_{produtividade esperada}) e para um determinado solo, caracterizado pelo valor do P-rem (CUB_{solo}). Inicialmente, calcula-se o CUB para qualquer solo (CUB_{médio}), considerando a média para solos em condições extremas de P-rem e dentro do intervalo de validade do modelo, ou seja, num solo com P-rem = 8 mg L⁻¹, o CUB será de 1.519 kg kg⁻¹, enquanto que num solo com P-rem = 48 mg L⁻¹, o CUB terá um valor de 846 kg kg⁻¹. Assim, o CUB_{médio} considerado é de 1.182 kg kg⁻¹. O CUB_{corrigido} é dado pela expressão:

$$\text{CUB}_{\text{corrigido}} = \text{CUB}_{\text{produtividade esperada}} (\text{CUB}_{\text{solo}} / \text{CUB}_{\text{médio}}) \quad (\text{Eq. 13})$$

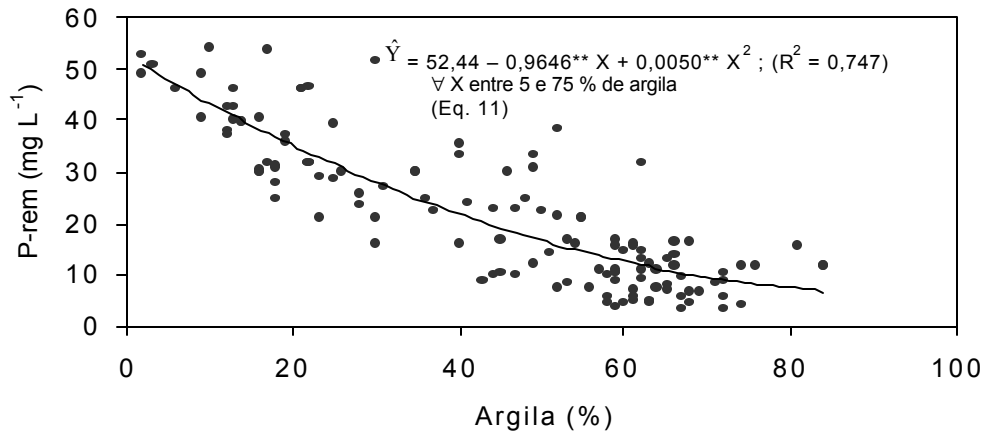


Figura 10. Valor de P remanescente em função do teor de argila em diferentes amostras de solo.

O $CUB_{\text{médio}}$ é dado por um valor constante (1.182 kg kg^{-1}) e o $CUB_{\text{corrigido}}$ representa uma correção do CUB para uma determinada produtividade esperada ($CUB_{\text{produtividade esperada}}$) e para um determinado solo (CUB_{solo}).

O CUB de colmos, folhas e raízes para uma determinada produtividade será corrigido, para cada condição de solo, pela Eq. 13. Portanto, para uma determinada produtividade em solos com diferentes valores de P-rem, pode-se calcular o $CUB_{\text{corrigido}}$ em cada situação, obtendo-se uma regressão múltipla para estimar o CUB de P em folhas e colmos e uma regressão simples para estimar o CUB de raízes que só vai variar com o P-rem, pelo menos nesta primeira versão.

Para se obter o $CUB_{\text{corrigido}}$ em colmos e folhas de cana soca e rressoca, é preciso considerar a perda de produtividade entre estes três cultivos, sendo também desnecessário obter-se o $CUB_{\text{corrigido}}$ de raízes pois, como discutido, considera-se que o suprimento de P para formação de novas raízes será função da ciclagem de nutrientes provenientes das folhas e das raízes velhas do ciclo anterior.

Optou-se por diferenciar os CUB de cana planta, soca e rressoca, o que, provavelmente, como se verá adiante, leva a recomendações de fertilizantes fosfatados diferenciadas para estes três tipos de cultivo pela peculiaridade de cada um deles.

Para P, o desenvolvimento de modelos contínuos em cultivos sucessivos estimando-se com boa exatidão o CUB e, posteriormente, a demanda nutricional é imprescindível para a previsão das adubações de implantação e manutenção para a cultura da cana-de-açúcar, em que o efeito residual do P aplicado no plantio e, teoricamente, a menor demanda da cana soca e ressoca são determinantes para recomendações de adubação fosfatada de manutenção.

Finalmente, estima-se o CUB de P em colmos, folhas e raízes de cana planta, soca e ressoca em função da produtividade esperada e do poder tampão de P do solo (Quadro 20). Para colmos e folhas, ajustaram-se modelos múltiplos, enquanto que para raízes, nesta primeira versão, só foi possível o ajuste de um modelo simples de acordo com o P_{rem} pela insuficiência de dados que relacionem produtividade esperada e CUB de raízes.

Para o S, os mesmos procedimentos utilizados para estimar o CUB de P foram também utilizados para a estimativa do CUB de S em cana planta. Para que não houvesse uma simples repetição dos métodos adotados, apresentam-se, diretamente, as regressões múltiplas do CUB de S, também, ajustadas usando os dados do trabalho de ORLANDO FILHO (1978) (Quadro 21).

Apesar da falta de dados que relacionem produção de raízes e CUB de S e partindo-se da expectativa de que o CUB de P em colmos e folhas tanto de cana planta como de cana soca é em torno de 2,5 vezes maior do que o CUB de S, pode-se considerar que, nas raízes, o CUB mantém a mesma relação. Se o CUB de P em raízes é de 2.500 kg kg⁻¹, o de S será de 1.000 kg kg⁻¹.

Para estimar o CUB de Zn, considera-se a planta toda, especificando apenas o cultivo, ou seja, estimando o CUB em cana planta e cana soca (ORLANDO FILHO, 1978). Isto se deve à falta de informações para se estimar o CUB de micronutrientes em colmos e folhas, separadamente. Em versões futuras, certamente a pesquisa poderá gerar dados que possam complementar as informações existentes.

Quadro 20. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de P (kg kg⁻¹) em colmos, folhas e raízes de cana planta e em colmos e folhas de cana soca e ressocas em função da produção de matéria seca (X, t ha⁻¹) e do valor do P-rem (Z, mg L⁻¹)

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 3.393,44 - 36,9102^{**} X - 41,5718^{**} Z + 0,1327^{**} Z^2 + 0,3808^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 5 \text{ e } 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 2.900, \forall X \leq 5 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 1.610, \forall X \leq 5 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 1.376, \forall X \geq 50 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 772, \forall X \geq 50 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,999
• Folhas	$\hat{Y} = 2.066,46 - 25,3250^{**} X - 25,7776^{**} Z + 0,0901^{**} Z^2 + 0,2611^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 3,2 \text{ e } 32 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 1.792, \forall X \leq 3,2 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 996, \forall X \leq 3,2 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 1.122, \forall X \geq 32 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 627, \forall X \geq 32 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,999
• Raízes	$\hat{Y} = 3.572,94 - 46,6764^{**} Z + 0,1983^{**} Z^2, \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 3.212, \forall Z \leq 8 \text{ e } \hat{Y} = 1.789, \forall Z \geq 48$	0,999
Cana soca		
• Colmo	$\hat{Y} = 1.561,38 - 11,4924^{**} X + 0,0173^0 X^2 - 19,4638^{**} Z + 0,0684^{**} Z^2 + 0,1134^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 3,4 \text{ e } 33,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 1.374, \forall X \leq 3,4 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 764, \forall X \leq 3,4 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 1.071, \forall X \geq 33,9 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 600, \forall X \geq 33,9 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,997
• Folhas	$\hat{Y} = 1.462,37 - 27,0474^{**} X - 18,2272^{**} Z + 0,0635^{**} Z^2 + 0,2787^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 2,2 \text{ e } 21,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 1.267, \forall X \leq 2,2 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 704, \forall X \leq 2,2 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 782, \forall X \geq 21,7 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 437, \forall X \geq 21,7 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,999
Ressoca		
• Colmo	$\hat{Y} = 1.563,80 - 10,8800^{**} X - 19,9378^{**} Z + 0,0775^{**} Z^2 + 0,1084^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 2,5 \text{ e } 25,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 1.384, \forall X \leq 2,5 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 771, \forall X \leq 2,5 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 1.157, \forall X \geq 25,2 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 643, \forall X \geq 25,2 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,999
• Folhas	$\hat{Y} = 1.466,22 - 26,9710^{**} X - 18,6351^{**} Z + 0,0723^{**} Z^2 + 0,2746^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 1,6 \text{ e } 16,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 1.282, \forall X \leq 1,6 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 716, \forall X \leq 1,6 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 923, \forall X \geq 16,1 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 516, \forall X \geq 16,1 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,999

⁰ e ** Significativo a 10 e 1 %, respectivamente.

Quadro 21. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de S (kg kg⁻¹) em colmos, folhas e raízes de cana planta e em colmos e folhas de cana soca e ressocas em função da produção de matéria seca (X, t ha⁻¹) e do valor do P-rem (Z, mg L⁻¹)

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 614,18 - 0,6628^{**}X - 0,0067X^2 - 1,2422^{**}Z + 0,0082Z^2$ $\forall X$ entre 5 e 50 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 601, \forall X \leq 5$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 570, \forall X \leq 5$ e $\forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 555, \forall X \geq 50$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 523, \forall X \geq 50$ e $\forall Z \geq 48$	0,975
• Folhas	$\hat{Y} = 499,53 - 1,5609^{**}X - 0,7379^{**}Z$ $\forall X$ entre 3,2 e 32 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 489, \forall X \leq 3,2$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 459, \forall X \leq 3,2$ e $\forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 444, \forall X \geq 32$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 414, \forall X \geq 32$ e $\forall Z \geq 48$	0,806
• Raízes	$\hat{Y} = 1.280,95 - 11,7213^{**}X + 0,0781^0X^2, \forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 1.192, \forall Z \leq 8$ e $\hat{Y} = 898, \forall Z \geq 48$	0,989
Cana soca		
• Colmo	$\hat{Y} = 450,67 - 3,4144^{**}X + 0,0395^{**}X^2 - 1,1721^{**}Z + 0,0107^{**}Z^2$ $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 431, \forall X \leq 3,4$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 408, \forall X \leq 3,4$ e $\forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 372, \forall X \geq 33,9$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 345, \forall X \geq 33,9$ e $\forall Z \geq 48$	0,986
• Folhas	$\hat{Y} = 455,34 - 2,4977^{**}X - 1,6351^{**}Z + 0,0160^{**}Z^2$ $\forall X$ entre 2,2 e 21,7 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 438, \forall X \leq 2,2$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 408, \forall X \leq 2,2$ e $\forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 389, \forall X \geq 21,7$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 359, \forall X \geq 21,7$ e $\forall Z \geq 48$	0,969
Ressoca		
• Colmo	$\hat{Y} = 468,99 - 2,3161^{**}X - 0,6704^{**}Z$ $\forall X$ entre 2,5 e 25,2 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 458, \forall X \leq 2,5$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 431, \forall X \leq 2,5$ e $\forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 405, \forall X \geq 25,2$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 378, \forall X \geq 25,2$ e $\forall Z \geq 48$	0,933
• Folhas	$\hat{Y} = 504,00 - 2,3289^{**}X - 0,0554^{**}X^2 - 1,4358^{**}Z + 0,0131^{**}Z^2$ $\forall X$ entre 1,6 e 16,1 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹ $\hat{Y} = 491, \forall X \leq 1,6$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 463, \forall X \leq 1,6$ e $\forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 477, \forall X \geq 16,1$ e $\forall Z \leq 8$; $\hat{Y} = 448, \forall X \geq 16,1$ e $\forall Z \geq 48$	0,984

⁰, * e ** Significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente.

Quadro 22. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de Zn (kg kg^{-1}) em cana planta e soca em função da produção de matéria seca (X, t ha^{-1}) e do valor do P-rem (Z, mg L^{-1})

Cultivo	Equação	R ²
• Cana planta	$\hat{Y} = 117,76 - 0,3617^{**}X - 0,0062^{**}X^2 - 0,4039^{**}Z + 0,0031^0XZ$ $\forall X \text{ entre } 5 \text{ e } 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 113, \forall X \leq 5 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 97, \forall X \leq 5 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 82, \forall X \geq 50 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 72, \forall X \geq 50 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,950
• Cana soca	$\hat{Y} = 126,46 - 0,7572^{**}X - 0,0047^0X^2 - 0,5322^{**}Z + 0,0044^{**}Z^2$ $\forall X \text{ entre } 3,4 \text{ e } 33,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$ $\hat{Y} = 120, \forall X \leq 3,4 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 108, \forall X \leq 3,4 \text{ e } \forall Z \geq 48$ $\hat{Y} = 91, \forall X \geq 33,9 \text{ e } \forall Z \leq 8; \hat{Y} = 80, \forall X \geq 33,9 \text{ e } \forall Z \geq 48$	0,981

⁰ e ** Significativo a 10 e a 1 %, respectivamente.

Para Zn, o CUB varia tanto com a produtividade esperada como com o poder tampão do solo expresso pelo P-rem. Dessa forma, o CUB deste micronutriente é estimado utilizando-se os mesmos procedimentos adotados para P e S (Quadro 22).

4.3.2. Demanda de fósforo, de enxofre e de zinco

A demanda de P para cultivos sucessivos em cana-de-açúcar é, como no caso do K, diferenciada para cana planta, soca e ressocas, com a particularidade de ser função tanto da produtividade como do poder tampão de fosfatos do solo, medido pelo P-rem. Para plantas cultivadas em solos, a demanda é maior do que em solos e mais intemperizados, uma vez que solos neste estágio de desenvolvimento passam a ser preferencialmente drenos, concorrendo mais intensamente com a planta pelo P adicionado.

Por ser um nutriente absorvido em quantidade relativamente pequena pela cana-de-açúcar, quando comparado a N e K (Quadro 3), a demanda total de P, considerando uma produtividade esperada de 100 t ha^{-1} e em solos com valores extremos de P-rem, maiores ou iguais a 48 mg L^{-1} , é de $44,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (Quadro 23) em cana planta, enquanto que para esta mesma produtividade a demanda por K é de $165,2 \text{ kg ha}^{-1}$

(Quadro 17). Em cana soca, a maior demanda a K faz com que a de P seja ainda menor do que a demanda de K.

A estimativa da demanda de P para os cultivos de cana planta, soca e ressoça é obtida ajustando-se regressões múltiplas que relacionam demanda de P com a produtividade esperada e o valor do P-rem, considerando a ciclagem de nutrientes e a incorporação de resíduos (Quadro 23).

A expectativa é de que haja uma redução gradativa na demanda de P da cana planta até a ressoça, o que leva a crer que haja duas diferentes situações no que diz respeito a demanda de P: uma primeira situação de implantação (cana planta); e uma segunda situação de manutenção (cana soca e ressoças).

A diferenciação dessas demandas irá, certamente, possibilitar recomendar fertilizantes fosfatados de forma mais criteriosa e, especificamente no caso da cana soca, em que a demanda de manutenção é ligeiramente maior em relação à demanda das ressoças, mostra um mais elevado acúmulo de P em cana soca, diferenciando, claramente, a soca das ressoças.

Fundamentalmente, fica claro, que não se pode tratar um cultivo de cana soca como se tratam as ressoças, principalmente quanto às exigências de P, como vem sendo praticado por todas as tabelas de recomendação de fertilizantes fosfatados em cana-de-açúcar no Brasil.

No caso do S, a estimativa da demanda nutricional segue os mesmos procedimentos utilizados para P. A demanda é função tanto da produtividade esperada como do P-rem. Apenas para evitar que os mesmos cálculos mostrados para P não se tornem repetitivos para S, apresentam-se diretamente os modelos finais que estimam as demandas deste nutriente em cana planta, soca e ressoças, sem considerar-se a ciclagem de S, devido a sua intensa volatilização provocada pela queima da cana durante a colheita (Quadro 24).

A demanda de micronutrientes é função, no caso do Zn, da produtividade e do P-rem. Essa demanda é estimada para formação de toda a biomassa da planta para uma determinada produtividade e num dado tipo de solo, conforme discutido (Quadro 25).

Quadro 23. Demanda de P para os cultivos de cana planta, soca e ressocas (kg ha⁻¹) em função da produtividade esperada (X, t ha⁻¹) e do valor do P-rem (Z, mg L⁻¹), considerando a ciclagem de nutrientes e a incorporação de resíduos

Equação	R ²
Cana planta ⁽¹⁾	
$\hat{Y} = 10,88 - 0,0651^{**} X + 0,0016^{**} X^2 - 0,4657^{**} Z + 0,0055^{**} Z^2 + 0,0070^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 20 \text{ e } 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,998
Cana soca	
$\hat{Y} = 6,64 + 0,0964^{**} X + 0,0018^{**} X^2 - 0,3801^{**} Z + 0,0051^{**} Z^2 + 0,0089^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 13,6 \text{ e } 135,6 \text{ t ha}^{-1} \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,999
Ressoca	
$\hat{Y} = 3,89 + 0,1506^{**} X + 0,0015^{**} X^2 - 0,2483^{**} Z + 0,0036^{**} Z^2 + 0,0079^{**} XZ$ $\forall X \text{ entre } 10,1 \text{ e } 100,7 \text{ t ha}^{-1} \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,999

⁽¹⁾ Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado nas equações, substituem-se as produtividades e os valores de P-rem limites nas regressões e obtêm-se as demandas. Por exemplo, para $\forall X \leq 20 \text{ t ha}^{-1}$ e $\forall Z \leq 8 \text{ mg L}^{-1}$, a demanda de P é de 8,0 kg ha⁻¹. Este mesmo procedimento deve ser adotado nas regressões de cana soca e ressocas;

** Significativo a 1%.

Quadro 24. Demanda de S para os cultivos de cana planta, soca e ressocas (kg ha⁻¹) em função da produtividade esperada (X, t ha⁻¹) e do valor do P-rem (Z, mg L⁻¹), considerando a incorporação de resíduos

Equação	R ²
Cana planta ⁽¹⁾	
$\hat{Y} = - 7,19 + 0,7948^{**} X + 0,0005^{**} X^2 + 0,1882^{**} Z$ $\forall X \text{ entre } 20 \text{ e } 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,993
Cana soca	
$\hat{Y} = - 10,35 + 1,4135^{**} X - 0,0018^{**} X^2 + 0,1350^{**} Z$ $\forall X \text{ entre } 13,6 \text{ e } 135,6 \text{ t ha}^{-1} \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,995
Ressoca	
$\hat{Y} = - 1,11 + 0,8906^{**} X + 0,0012^{**} X^2 + 0,0903^{**} Z$ $\forall X \text{ entre } 10,1 \text{ e } 100,7 \text{ t ha}^{-1} \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,996

⁽¹⁾ Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado nas equações, substituem-se as produtividades e os valores de P-rem limites nas regressões e obtêm-se as demandas. Por exemplo, para $\forall X \leq 20 \text{ t ha}^{-1}$ e $\forall Z \leq 8 \text{ mg L}^{-1}$, a demanda de S é de 10,4 kg ha⁻¹. Este mesmo procedimento deve ser adotado nas regressões de cana soca e ressocas.

* e ** Significativos a 5 e a 1%, respectivamente.

Quadro 25. Demanda de Zn em cana planta e soca (g ha^{-1}) em função da produtividade esperada ($X, \text{t ha}^{-1}$) e do P-rem ($Z, \text{mg L}^{-1}$), considerando a ciclagem de nutrientes e a incorporação de resíduos

Cultivo	Equações	R ²
• Cana planta ⁽¹⁾	$\hat{Y} = -18,05 + 1,7983^{**}X + 0,0067^{**}X^2 + 1,1475^{**}Z$ $\forall X \text{ entre } 20 \text{ e } 200 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,998
• Cana soca	$\hat{Y} = 9,67 + 1,5944^{**}X + 0,0075^{**}X^2 - 0,1377^{*}Z + 0,0101^{**}XZ$ $\forall X \text{ entre } 13,6 \text{ e } 135,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$	0,999

⁽¹⁾ Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado nas equações, substituem-se as produtividades e os valores de P-rem limites nas regressões e obtêm-se as demandas. Por exemplo, para $\forall X \leq 20 \text{ t ha}^{-1}$ e $\forall Z \leq 8 \text{ mg L}^{-1}$, a demanda de Zn é de $30,0 \text{ g ha}^{-1}$. Este mesmo procedimento deve ser adotado na regressão para cana soca.

* e ** Significativo a 5 e a 1%, respectivamente.

4.3.3. Taxa de recuperação de fósforo, de enxofre e de zinco pela planta

A planta apresenta diferentes taxas de recuperação para os diversos nutrientes e solos. No caso específico do P, S e Zn a taxa de recuperação, além de ser função da dose aplicada, é também função do poder tampão, representado pelo valor do P-rem. Assim, procedendo da mesma forma que para o CUB de P, a taxa de recuperação em função da dose precisa ser corrigida pelo P-rem.

Para encontrar a taxa de recuperação corrigida ($TR_{\text{corrigida}}$) a partir da taxa de recuperação para uma determinada dose (TR_{dose}) e para um determinado solo, caracterizado pelo valor do P-rem (TR_{solo}), inicialmente calcula-se a taxa de recuperação para qualquer solo ($TR_{\text{média}}$), considerando solos em condições extremas de P-rem e dentro do intervalo de validade do modelo, ou seja, num solo com $P\text{-rem} = 8 \text{ mg L}^{-1}$, a taxa de recuperação será de $0,05 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$, enquanto que num solo com $P\text{-rem} = 48 \text{ mg L}^{-1}$, a recuperação terá um valor de $0,20 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$.

Esses valores não tiveram o respaldo de dados experimentais para cana-de-açúcar até o momento. Porém, a expectativa teórica é que em solos muito argilosos e mais intemperizados, a taxa de recuperação de P

pela planta esteja em torno de 5 % e que em solos arenosos, esta taxa não exceda 20 % (MUNIZ, 1983; FONSECA, 1987). Portanto, a $TR_{m\acute{e}dia}$ considerada é de $0,125 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$. A $TR_{corrigida}$ é dada pela expressão:

$$TR_{corrigida} = TR_{dose} \times (TR_{solo} / TR_{m\acute{e}dia}) \quad (\text{Eq. 14})$$

A $TR_{corrigida}$ representa uma correção da taxa de recuperação média para uma determinada dose (TR_{dose}) e para um determinado solo (TR_{solo}).

Para simular a taxa de recuperação em função da dose (TR_{dose}), considera-se as demandas nutricionais médias em cana planta, soca e ressoca equivalentes a doses. Como limite superior, utilizou-se a demanda em cana planta para uma produtividade esperada de 200 t ha^{-1} e como limite inferior a demanda de P em ressoca para uma produtividade em torno de 10 t ha^{-1} . Por outro lado, é preciso saber qual a taxa de recuperação para diferentes doses de P aplicadas ao solo. KORNDÖRFER (1990), trabalhando com fertilizantes fosfatados sólidos e fluidos em cana-de-açúcar, mostrou que o P acumulado na parte aérea pela cana planta representou menos de 35 % da quantidade total aplicada. No entanto, PENATTI (1991) não encontrou taxas de recuperação superiores a 7 %. Assim, considera-se que para a menor dose aplicada, a taxa de recuperação é de 35 % e para a maior é de 7 %.

Deste modo, ajustou-se um modelo múltiplo que relaciona a taxa de recuperação de P em função da dose e do valor do P-rem, conforme equação:

$$\hat{Y} = 0,06 - 0,0004^{**}X + 0,0107^{**}Z - 0,00007^{**}XZ; (R^2 = 0,987) \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\forall X \text{ entre } 5 \text{ e } 125 \text{ kg ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$$

em que \hat{Y} é a taxa de recuperação de P ($\text{kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$). Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado na equação, substituem-se as doses e os valores de P-rem limites na regressão e obtêm-se as taxas de recuperação; X é a dose de P aplicada (kg ha^{-1}); Z é o P-rem (mg L^{-1}).

Futuras versões poderão dispor da relação entre taxa de recuperação de P pela cana-de-açúcar e P-rem, ajustando um modelo mais consistente e comprovado por dados experimentais.

A taxa de recuperação de S é também função tanto da dose como do P-rem. No entanto, devido à falta de dados que possibilitem afirmações conclusivas a esse respeito, aliada a toda uma semelhança na dinâmica deste nutriente no solo com a do P, considera-se, nesta primeira versão, as mesmas taxas de recuperação que aquelas consideradas para o P. Assim, ajustou-se um modelo múltiplo que relaciona a taxa de recuperação de S em função da dose e do P-rem, conforme a equação:

$$\hat{Y} = 0,28 - 0,0025^{**}X + 0,000005^{**}X^2 + 0,0043^{**}Z - 0,00003^{**}Z^2 \quad (\text{Eq. 16})$$

$$(R^2 = 0,989) ; \forall X \text{ entre } 8,0 \text{ e } 190 \text{ kg ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$$

em que \hat{Y} é a taxa de recuperação de S ($\text{kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$). Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado na equação, substituem-se as doses e os valores de P-rem limites na regressão e obtêm-se as taxas de recuperação; X é a dose de S (kg ha^{-1}); Z é o P-rem (mg L^{-1}).

Para Zn, o trabalho de ANDRADE (1990) mostrou taxas de recuperação de Zn da ordem de 5 a 10 %, sem considerar, no entanto, o poder tampão do solo. Assim, da mesma forma como se procedeu para P e S, ajustou-se uma regressão múltipla, modelando-se a taxa de recuperação da planta em função da dose e do P-rem.

$$\hat{Y} = 0,05 - 0,1136^{**}X + 0,0618^{**}X^2 + 0,0020^{**}Z - 0,00001^{**}Z^2 \quad (\text{Eq. 17})$$

$$(R^2 = 0,987) ; \forall X \text{ entre } 0,028 \text{ e } 0,700 \text{ kg ha}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$$

em que \hat{Y} é a taxa de recuperação de Zn ($\text{kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$). Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado na equação, substituem-se as doses e os valores de P-rem limites na regressão e obtêm-se as taxas de recuperação; X é a dose de Zn (kg ha^{-1}); Z é o P-rem (mg L^{-1}).

4.3.4. Disponibilidade de fósforo, de enxofre e de zinco

Para avaliar a disponibilidade de P, é necessária a análise de solo e consideram-se como métodos de extração o Mehlich-1 e a Resina Mista.

Nos estados do Nordeste, onde a cultura da cana-de-açúcar tem uma expressão significativa, os solos são, em sua grande maioria, menos ácidos do que nas outras regiões do País onde se cultiva a cana, sendo também comum a formação de compostos pouco solúveis de fosfatos de cálcio. Nessas regiões, a utilização do Mehlich-1 é controversa. Se por um lado, o extrator sofre um maior desgaste devido aos solos serem menos ácidos, por outro, a solubilização de compostos como estes, liberando P, pode, provavelmente, superestimar o disponível, já que o P de compostos dessa natureza pode ser inacessível às plantas.

Por outro lado, plantas que são capazes de acidificar a rizosfera poderiam utilizar esses compostos de P ligado a Ca, sendo provável que, nesses casos, o P absorvido se correlacione significativamente com o P disponível pelo Mehlich-1.

O mais importante, no momento, é que se alerte para a realização de futuras pesquisas, inclusive onde se possa estudar a capacidade dos extratores Bray-1 e Mehlich-3 para avaliar o P disponível em regiões que apresentem solos com as características comentadas.

O resultado da análise de solo por si só, principalmente para se avaliar a quantidade disponível de P, pouco representa. É necessário conhecer-se, também, qual a capacidade tampão de fosfatos do solo, pois extratores como o Mehlich-1 são sensíveis a esta característica, ou seja, extraem mais P em solos com baixo poder tampão.

Como medida do poder tampão de fosfatos do solo, considera-se o P-rem. Desse modo, ajustou-se um modelo que relaciona $\Delta P_{rp}/\Delta P_{ap}$ (taxa de recuperação pelo extrator do P aplicado) em função do P-rem (Figura 11).

Para o ajuste deste modelo utilizaram-se dados de FONSECA (1987), GUSS (1988) e NOVELINO (1999). Consideraram-se taxas de recuperação de P pelo Mehlich-1 entre 0,10 e 0,33 mg dm⁻³/kg ha⁻¹, para solos com valores de P-rem entre 8 e 48 mg L⁻¹. Embora as maiores doses utilizadas por esses pesquisadores tenham sido superiores a 500 mg dm⁻³

de P, considerou-se a linearidade do modelo para doses até este valor. Acima dele, é muito provável que o melhor ajuste seja curvilíneo. Como na prática o intervalo de doses é pequeno, utilizou-se o ajuste linear como a melhor aproximação para doses normalmente utilizadas.

Diferentemente do comportamento do Mehlich-1, a Resina, teoricamente, não varia com o poder tampão de fosfatos do solo. No entanto, como o tempo de extração utilizado na análise é pequeno, certamente, a Resina extrai apenas uma fração do fator quantidade (OLIVEIRA, 1998). Porém, nesta primeira versão, ainda não foi possível relacionar esta sensibilidade com nenhuma medida do poder tampão de fosfatos do solo.

Dessa forma, para se ter uma única recuperação pelo extrator em função do aplicado, como foi para Ca, Mg e K, ajustou-se um modelo para estimar esta recuperação pela Resina (Figura 12).

Para o ajuste deste modelo, utilizaram-se dados de MOURA FILHO (1990) e NOVELINO (1999) pelo fato desses pesquisadores terem trabalhado com as mesmas doses de P para avaliar a recuperação tanto pela Resina como pelo Mehlich-1, além de terem determinado o P-rem para todos os solos utilizados.

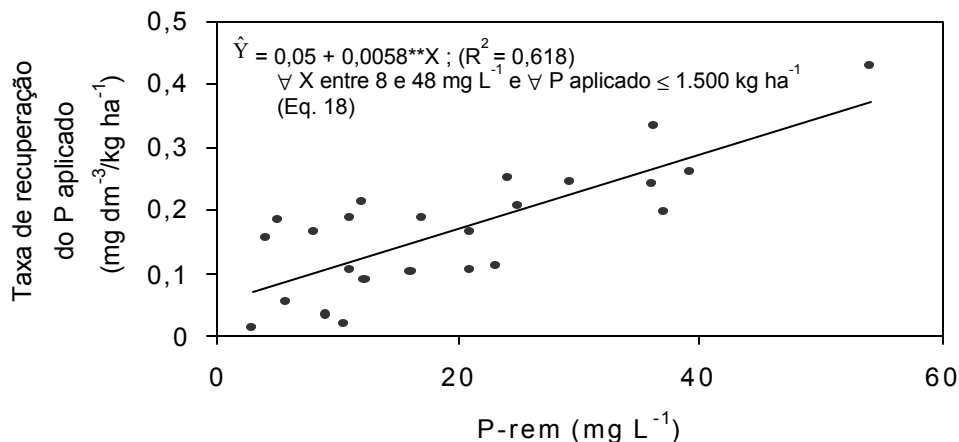


Figura 11. Relação da recuperação de P em amostras de diferentes solos pelo Mehlich-1 em função do P-rem.

Os solos de várzea utilizados por MOURA FILHO (1990) são largamente cultivados com cana-de-açúcar no estado do Rio de Janeiro e representam uma parcela considerável dos solos cultivados com cana no Nordeste do Brasil.

Apesar de não se encontrar na literatura relação do P recuperado pela Resina e alguma medida do poder tampão de fosfatos do solo (MOURA FILHO, 1990; OLIVEIRA, 1998; NOVELINO, 1999), a dispersão de dados (Figura 12), mostrando recuperações até 3 vezes maiores para uma mesma dose aplicada em solos com diferentes valores de capacidade tampão, sugere a necessidade de se continuar pesquisando para elucidar questões ainda pouco esclarecidas como esta.

A disponibilidade de S é avaliada utilizando-se como extrator o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ na concentração de 500 mg L^{-1} de P em $\text{HOAc } 2,0 \text{ mol L}^{-1}$. Porém, assim como para o P, sua disponibilidade é função de uma medida do poder tampão, como o P-rem. Dessa forma, utiliza-se o modelo desenvolvido por ALVAREZ V. (1996) que estima a $\Delta\text{Srp}/\Delta\text{Sap}$ (taxa de recuperação pelo extrator do S aplicado) em função do P-rem, conforme a equação:

$$\hat{Y} = 0,04 + 0,00285^{**}X ; (R^2 = 0,955) \quad (\text{Eq. 20})$$

$$\forall X \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1}$$

em que \hat{Y} é o $\Delta\text{Srp}/\Delta\text{Sad}$ ($\text{mg dm}^{-3}/\text{kg ha}^{-1}$); X é o P-rem (mg L^{-1}).

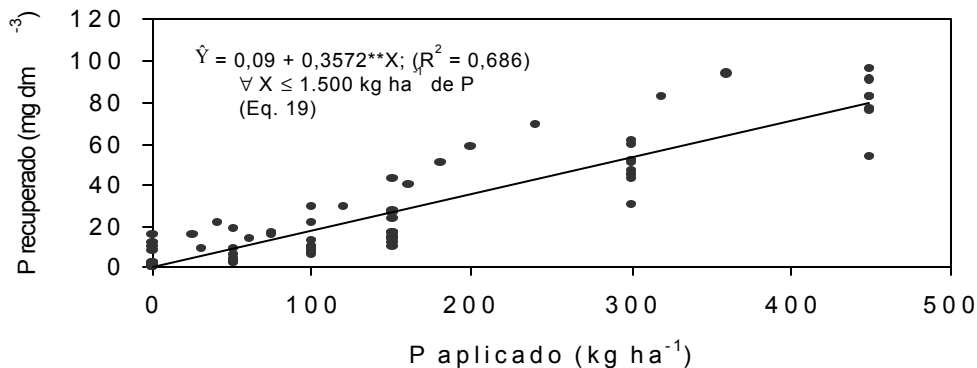


Figura 12. Relacionamento entre teor de P recuperado em amostras de diferentes solos pela Resina em função da dose aplicada.

A disponibilidade de Zn, assim como o P e o S, varia com a taxa de recuperação do Zn aplicado, sendo também função da capacidade tampão do solo (estimada pelo P-rem), conforme modelo:

$$\hat{Y} = 0,16 + 0,0017^{**}X; (R^2 = 0,658) \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\forall X \text{ entre } 8 \text{ e } 48 \text{ mg L}^{-1} \text{ e } \forall \text{ Zn aplicado} \leq 50 \text{ kg ha}^{-1}$$

em que \hat{Y} é o $\Delta Znrp/\Delta Znap$ ($\text{mg dm}^{-3}/\text{kg ha}^{-1}$); X é o P-rem (mg L^{-1})

Para o ajuste deste modelo, utilizaram-se dados do trabalho de COUTO et al. (1992), em que a disponibilidade de Zn foi avaliada pelo Mehlich-1 em doze amostras de solos do estado de Minas Gerais.

4.3.5. Efeito residual de P

Considera-se que a disponibilidade de P em solos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar está diretamente relacionada com os efeitos cumulativos das aplicações de P e, conseqüentemente, com o efeito residual deste nutriente. Segundo SILVA (1996), o aumento do P disponível pelo Mehlich-1, em até 25 anos de cultivo contínuo com cana foi função do efeito residual do P aplicado.

Assim, NOVAIS & SMYTH (1999), baseados nos trabalhos de BARROW (1980), COX et al. (1981), MUNIZ et al. (1987), GONÇALVES et al. (1989) e FIXEN & GROVE (1990), apresentaram um exemplo de modelagem mostrando o que tem sido feito sobre a estimativa do residual de P em solos. No SBNR-C, o modelo exponencial apresentado por esses autores, com algumas adaptações, mostrou-se consistente pelo menos para esta primeira versão. Deste modo, consideram-se dois tipos de efeitos residuais em cana-de-açúcar: o efeito residual de P em cana soca, que corresponde ao resíduo da dose de P aplicada em cana planta, e o efeito residual de P em ressocas, que corresponde ao resíduo da dose de P utilizada para cana soca.

Embora se reconheça que ao final de todo o ciclo de cultivo haja um resíduo de P que deva ser computado como uma entrada deste nutriente em cana planta, a análise do solo que normalmente é realizada antes da renovação do canavial irá, certamente, quantificar este resíduo de P. Por outro lado, em socas e ressocas, é pouco comum a prática da análise de

solo, o que justifica computar, nestes cultivos, os efeitos residuais dos fertilizantes fosfatados aplicados no cultivo antecedente.

Para Mehlich-1, o efeito residual de P para cana soca e ressoca é:

$$ER = \{[0,05 + 0,0058 (P\text{-rem})] D\} \times e^{-[0,000513637 + 0,0000284091^{**}(P\text{-rem})] \times t} \quad (\text{Eq. 22})$$

em que ER é o efeito residual de P (mg dm^{-3}); $0,05 + 0,0058 (P\text{-rem})$ é a regressão que estima o $\Delta P_{rp}/\Delta P_{ap}$ ($\text{mg dm}^{-3}/\text{kg ha}^{-1}$) em função do P-rem, definida anteriormente; D é a dose de P recomendada para ser aplicada em área total em cana planta ou soca (kg ha^{-1}); e é a base do logaritmo neperiano; $- [0,000513637 + 0,0000284091^{**}(P\text{-rem})] \times t$ é a regressão que estima a perda ou diminuição do P disponível no tempo ($\text{mg dm}^{-3} \text{ dia}^{-1}$), ajustada com dados do trabalho de GONÇALVES et al. (1989), em função do P-rem, ou seja, quando o extrator é o Mehlich-1 esta perda depende do poder tampão de fosfato do solo; t é o tempo decorrido da aplicação da dose do fertilizante até o início da rebrota subsequente (dias).

Para exemplificar a utilização deste modelo, imagine-se que para um cultivo de cana planta com um ciclo de 18 meses (540 dias), aplicou-se uma dose de 100 kg ha^{-1} de P no plantio, em um solo com 20 mg L^{-1} de P-rem. O efeito residual de P estimado pelo modelo (Eq. 22) para cana soca é de aproximadamente $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$, o que corresponde a uma adição de cerca de 54 kg ha^{-1} de P. É evidente que a disponibilidade efetiva é um valor bem menor que este; no entanto, não se pode deixar de admitir que representa uma entrada de P em cana soca que não pode deixar de ser computada.

Por outro lado, o efeito residual depende também do tempo de equilíbrio do P com o solo. Quanto maior este tempo, para um mesmo solo, maior é a passagem de formas lábeis para não-lábeis e, conseqüentemente, menor o resíduo do fertilizante aplicado. Isto significa que quanto menor o tempo de cultivo da cana planta, por exemplo, com uso de variedades mais precoces, maior será o efeito residual de P em socas.

Quando o extrator utilizado para estimar o efeito residual do P aplicado for a Resina, o modelo deixa de ter uma variável de medida do poder tampão de fosfatos do solo, como o P-rem, passando, então a ser expresso:

$$ER = [0,3572 D] e^{-kt} \quad (\text{Eq. 23})$$

em que ER é o efeito residual de P (mg dm^{-3}); 0,3572 é o coeficiente angular da regressão que estima o P recuperado pela Resina (mg dm^{-3}) em função da dose aplicada, definida anteriormente; D é a dose de P recomendada para ser aplicada em área total em cana planta ou soca (kg ha^{-1}); e é a base do logaritmo neperiano; k é a constante de perda ou diminuição do P disponível ($0,0013 \text{ mg dm}^{-3} \text{ dia}^{-1}$), obtida do trabalho de GONÇALVES et al. (1989), que representa um valor médio independente do poder tampão de fosfatos do solo quando o extrator é a Resina; t é o tempo decorrido da aplicação da dose do fertilizante até o início da rebrota subsequente (dias).

4.3.6. Adubação fosfatada

Sugerem-se três diferentes demandas para os cultivos de cana planta, soca e ressocas, o que significa recomendações de quantidades diferenciadas de fertilizantes fosfatados para estes três cultivos, principalmente em soca e ressocas, o que as tabelas de recomendação usuais não fazem.

Para simular como se recomendam fertilizantes fosfatados em cana-de-açúcar, utilizam-se resultados de análises de solo da região de Guaxupé, no estado de Minas Gerais (Quadro 26), para a disponibilidade de P pelo Mehlich-1 e Resina. Diante da dificuldade da obtenção de resultados de análises que reúnam P pelo Mehlich-1, pela Resina e P-rem, transformou-se teor de argila em P-rem (Eq.10). A simulação da recomendação consistiu em avaliar a quantidade de fertilizante fosfatado a ser recomendada na forma de dose de P para produtividades baixas, até 50 t ha^{-1} ; médias, em torno de 100 t ha^{-1} e, altas, acima de 150 t ha^{-1} de colmos. Para exemplificar como são realizados os cálculos para cana planta, soca e ressocas serão utilizados os resultados da análise do solo 1 (Quadro 26). No exemplo, toma-se como produtividade esperada em cana planta 150 t ha^{-1} , $101,7 \text{ t ha}^{-1}$ em soca e $75,5 \text{ t ha}^{-1}$ em ressocas (Eq. 1).

Primeiramente, estimam-se as demandas nutricionais em cana planta, soca e ressocas de acordo com a produtividade e com o valor de P-rem (Quadro 23):

Demanda de P em cana planta (150 t ha^{-1} ; 42 mg L^{-1}) = $71,4 \text{ kg ha}^{-1}$

Demanda de P em cana soca ($101,7 \text{ t ha}^{-1}$; 42 mg L^{-1}) = $66,1 \text{ kg ha}^{-1}$

Demanda de P em ressoca ($75,5 \text{ t ha}^{-1}$; 42 mg L^{-1}) = $44,8 \text{ kg ha}^{-1}$

Para que as plantas possam absorver estas quantidades, é preciso conhecer a quantidade que o solo deveria ter. Para isso, é necessário estimar a taxa de recuperação do nutriente pela planta (Eq. 15).

Taxa de recuperação de P em cana planta = $0,27 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$

Taxa de recuperação de P em cana soca = $0,29 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$

Taxa de recuperação de P em ressoca = $0,36 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$

Quadro 26. Disponibilidade de P pelo Mehlich-1 e Resina, teor de argila e estimativa do P-rem em diferentes amostras de solos

Solo ⁽¹⁾	P Mehlich -1	P Resina	Teor de argila	P-rem ⁽²⁾
	_____ mg dm^{-3} _____		%	mg L^{-1}
1	10,8	22,7	12	42
2	53,2	83,5	21	34
3	34,8	69,5	30	28
4	22,1	23,2	35	25
5	2,8	8,7	41	21
6	15,5	57,0	48	18
7	2,4	11,0	52	16
8	16,6	43,5	59	13
9	7,3	29,0	63	12
10	28,2	59,0	65	11

⁽¹⁾ Amostras de solos provenientes da região de Guaxupé no estado de Minas Gerais; ⁽²⁾ Valor estimado em função do teor de argila das amostras de solo (Eq. 10).

Dessa forma, para que a planta possa absorver a quantidade demandada para a produtividade esperada, o solo teria que receber uma dose de P correspondente ao requerimento pela planta de:

$$\text{P para cana planta} = \frac{71,4}{0,27} = 264,4 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P \text{ para cana soca} = \frac{66,1}{0,29} = 227,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$P \text{ para ressoca} = \frac{44,8}{0,36} = 124,4 \text{ kg ha}^{-1}$$

Com estas quantidades de P que deveria ter o solo, estimam-se os níveis críticos. Especificamente no caso do P, o uso de dois extratores (Mehlich-1 e Resina) proporciona diferentes níveis críticos. Para o Mehlich-1, os níveis críticos de P variam com a produtividade esperada e o poder tampão de P do solo (P-rem). Neste caso, é preciso estimar primeiro o $\Delta P_{rp}/\Delta P_{ap}$ (taxa de recuperação por Mehlich-1 do P aplicado) em função do P-rem (Eq. 18), sendo este coeficiente angular de:

$$\Delta P_{rp}/\Delta P_{ap} = 0,29 \text{ mg dm}^{-3}/\text{kg ha}^{-1}$$

Portanto, os níveis críticos em cana planta, soca e ressocas são de:

$$\text{Nível crítico de P em cana planta} = 264,4 \times 0,29 = 76,7 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de P em cana soca} = 227,9 \times 0,29 = 66,1 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de P em ressoca} = 124,4 \times 0,29 = 36,1 \text{ mg dm}^{-3}$$

Quando o extrator é a Resina, o $\Delta P_{rp}/\Delta P_{ap}$ não varia com a capacidade tampão do solo, como discutido. Neste caso, estimam-se os níveis críticos (Eq. 19) em cana planta, soca e ressocas, com taxa única:

$$\text{Nível crítico de P em cana planta} = 264,4 \times 0,3572 = 94,4 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de P em cana soca} = 227,9 \times 0,3572 = 81,4 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Nível crítico de P em ressoca} = 124,4 \times 0,3572 = 44,4 \text{ mg dm}^{-3}$$

Para calcular qual a dose de P a ser recomendada, subtrai-se do teor crítico o teor encontrado no resultado da análise do solo e divide-se pela taxa de recuperação do extrator.

Considerando que o resultado da análise do solo (Quadro 26), corresponde a uma amostragem realizada antes do plantio, primeiro calcula-se a dose recomendada para cana planta. Assim, se a análise foi realizada pelo Mehlich-1, a dose recomendada será de:

$$\text{Dose recomendada de P para cana planta} = \frac{76,7 - 10,8}{0,29} = 227,2 \text{ kg ha}^{-1}$$

Entretanto, se a análise foi realizada pelo método da Resina, a dose recomendada de P será de:

$$\text{Dose recomendada de P para cana planta} = \frac{94,4 - 22,7}{0,3572} = 200,7 \text{ kg ha}^{-1}$$

Se antes da rebrota da soca e, ou, das ressocas for realizada uma análise do solo, então, para calcular a dose a ser recomendada de P nestes cultivos procede-se como da maneira descrita para cana planta, utilizando-se os níveis críticos estimados para soca e ressocas.

No entanto, mesmo não dispondo de um resultado de análise de solo antes destes cultivos, pode-se prever qual será a dose recomendada de P em soca por meio da estimativa do efeito residual do P aplicado em cana planta (resíduo de P para soca). Dessa forma, considerando que não se dispõe do resultado da análise de solo antes da rebrota da soca, estima-se o efeito residual de P para este cultivo (Eq. 22 e 23):

$$\text{Efeito residual de P em cana soca (Mehlich-1)} = 26,5 \text{ mg dm}^{-3}$$

$$\text{Efeito residual de P em cana soca (Resina)} = 35,5 \text{ mg dm}^{-3}$$

Da mesma maneira que para cana planta, calcula-se a dose a ser recomendada de P em cana soca quando o extrator é o Mehlich-1:

$$\text{Dose recomendada de P para cana soca} = \frac{66,1 - 26,5}{0,29} = 136,5 \text{ kg ha}^{-1}$$

Entretanto, se o extrator for a Resina, a dose recomendada de P será de:

$$\text{Dose recomendada de P para cana soca} = \frac{81,4 - 35,5}{0,3572} = 128,5 \text{ kg ha}^{-1}$$

Conhecendo a dose recomendada para cana soca, estima-se o efeito residual desta dose para a ressoca (Eq. 22 e 23):

$$\text{Efeito residual de P em ressoca (Mehlich-1)} = 21,7 \text{ mg dm}^{-3}$$

Efeito residual de P em ressoca (Resina) = 28,7 mg dm⁻³

Deste modo, em ressoca, a dose a ser recomendada quando o extrator é o Mehlich-1 é:

$$\text{Dose recomendada de P para ressoca} = \frac{36,1 - 21,7}{0,29} = 49,6 \text{ kg ha}^{-1}$$

No caso da Resina, a dose será:

$$\text{Dose recomendada de P para ressoca} = \frac{44,4 - 28,7}{0,3572} = 43,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

Estas são doses de P de uma fonte solúvel calculadas para serem aplicadas a lanço em área total e incorporadas de 0 até 30 cm de profundidade, como vem sendo considerado nas equações desenvolvidas. No entanto, o P é aplicado no sulco de plantio ou na linha das rebrotas, aumentando sua absorção, o que reduz as doses recomendadas. Considera-se que a cana planta é menos eficiente que a cana soca e a ressoca na absorção de P.

Pesquisas mostraram (KORNDÖRFER, 1990) que a eficiência da cana em absorver P do solo está diretamente relacionada à sua capacidade em explorá-lo. Assim, a cana soca, ainda que possua um ciclo menor (12 meses, em média) do que a cana planta (18 meses, em média), tem a vantagem de iniciar seu crescimento com um sistema radicular estabelecido, sendo esta uma das possíveis razões para a maior facilidade da cana soca aproveitar mais eficientemente o P disponível. É natural, porém, que esta eficiência se reduza com os ciclos sucessivos pela senescência das raízes e perda de suas atividades metabólicas (DILLEWIJN, 1952).

Considera-se que os divisores (fatores que transformam doses recomendadas de P de fontes solúveis para aplicação em área total em doses para serem aplicadas localizadamente) mais adequados para cana planta, soca e ressocas são 2,5, 5,0 e 3,5, respectivamente. Desse modo, retomando o exemplo anterior, quando o extrator for o Mehlich-1, as doses a serem recomendadas de P em cana planta, soca e ressocas são, respectivamente de 90,9, 27,3 e 14,2 kg ha⁻¹.

Estas recomendações em soca e ressocas sem o resultado da análise do solo se baseiam de modo particular, no efeito residual de P, cujo modelo parece ter se adequado bem tanto para o Mehlich-1 como para a Resina. No entanto, o ideal para estas recomendações em rebrota é que se faça a análise do solo para determinar o P disponível.

Outro aspecto importante é que os níveis críticos em planta e soca são próximos, decrescendo em ressocas. Isto sugere, como discutido na estimativa das demandas, que haja três diferentes níveis críticos: um de implantação em cana planta e dois de manutenção, diferenciando-se em soca e ressocas, sugerindo-se que as recomendações de P nesses cultivos sejam devidamente diferenciadas, o que não ocorre com as tabelas que recomendam fósforo em cana-de-açúcar no Brasil, o que provavelmente pode estar causando desperdício de adubo.

As doses a serem recomendadas de P em cana planta, soca e ressocas, assim como os níveis críticos para as produtividades esperadas de 50 e 100 t ha⁻¹ em cana planta para o solo 1 e os demais solos (Quadro 26), estão representadas nos quadros 27, 28 e 29, respectivamente.

Quadro 27. Doses de P a serem recomendadas para cana planta pelo SBNR-C em solos com diferentes características químicas

Solo ⁽¹⁾	P-rem ⁽²⁾	PDE ⁽³⁾	NCr ⁽⁴⁾		Dose de P ⁽⁵⁾	
			Mehlich-1	Resina	Mehlich-1	Resina
	mg L ⁻¹	t ha ⁻¹	mg dm ⁻¹		kg ha ⁻¹	
1	42	50	10,8	12,9	0,0	0,0
1	42	100	31,5	37,5	27,6	16,5
1	42	150	76,7	94,4	90,9	80,3
2	34	50	9,2	13,0	0,0	0,0
2	34	100	26,6	37,5	0,0	0,0
2	34	150	63,6	89,6	16,4	6,9
3	28	50	8,4	13,7	0,0	0,0
3	28	100	23,7	38,7	0,0	0,0
3	28	150	55,7	91,0	38,2	24,1
4	25	50	8,1	14,4	0,0	0,0
4	25	100	22,4	39,9	0,0	18,7
4	25	150	52,3	92,9	60,1	78,1
5	21	50	7,8	15,8	11,4	7,9
5	21	100	21,0	42,3	41,0	37,6
5	21	150	48,4	97,3	102,6	99,0
6	18	50	7,8	17,3	0,0	0,0
6	18	100	20,1	44,9	11,6	0,0
6	18	150	45,9	102,3	75,9	50,8
7	16	50	7,8	18,7	14,5	8,6
7	16	100	19,7	47,3	46,5	40,6
7	16	150	44,4	106,7	113,2	107,3
8	13	50	7,9	21,5	0,0	0,0
8	13	100	19,1	52,0	7,6	9,5
8	13	150	42,6	116,1	79,4	81,3
9	12	50	8,0	22,7	2,1	0,0
9	12	100	18,9	54,0	37,1	28,0
9	12	150	42,1	120,1	111,2	102,0
10	11	50	8,0	24,1	0,0	0,0
10	11	100	18,8	56,3	0,0	0,0
10	11	150	41,7	124,6	27,7	73,5

⁽¹⁾ Resultado das análises (Quadro 26); ⁽²⁾ Valor estimado em função do teor de argila das amostras de solo (Eq. 10); ⁽³⁾ Produtividade esperada em cana planta; ⁽⁴⁾ Nível crítico de P no solo; ⁽⁵⁾ Dose de P a ser aplicada localizadamente no sulco de plantio.

Quadro 28. Doses de P a serem recomendadas para cana soca pelo SBNR-C estimando-se o efeito residual de P da dose recomendada para cana planta e sem considerar este efeito em solos com diferentes características químicas

Solo ⁽¹⁾	P-rem ⁽²⁾	PDE ⁽³⁾	NCr ⁽⁴⁾		Dose de P ⁽⁵⁾		Dose de P ⁽⁶⁾	
			Mehlich-1	Resina	Mehlich-1	Resina	Mehlich-1	Resina
	mg L ⁻¹	t ha ⁻¹	- mg dm ⁻³ -		kg ha ⁻¹			
1	42	33,9	11,9	14,1	0,0	0,0	0,7	0,0
1	42	67,8	31,9	38,0	15,8	17,2	14,1	8,6
1	42	101,7	66,1	81,4	27,3	25,7	38,1	32,9
2	34	33,9	10,2	14,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2	34	67,8	27,3	38,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2	34	101,7	57,3	80,8	41,5	43,5	3,2	0,0
3	28	33,9	9,3	15,2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	28	67,8	24,5	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	28	101,7	50,6	82,7	36,9	40,3	14,4	7,4
4	25	33,9	9,0	15,9	0,0	0,0	0,0	0,0
4	25	67,8	23,3	41,4	0,0	18,5	1,2	10,2
4	25	101,7	47,7	84,8	31,9	28,1	25,5	34,5
5	21	33,9	8,6	17,4	6,6	7,8	6,6	4,8
5	21	67,8	22,0	44,1	13,2	15,4	21,6	19,8
5	21	101,7	44,4	89,2	21,7	25,4	46,8	45,1
6	18	33,9	8,5	19,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	18	67,8	21,1	47,1	23,0	0,0	7,0	0,0
6	18	101,7	42,2	94,1	30,9	40,1	33,4	20,8
7	16	33,9	8,5	20,4	7,1	9,3	8,2	5,3
7	16	67,8	20,7	49,7	14,0	17,8	24,6	21,6
7	16	101,7	41,0	98,5	21,6	28,6	51,9	49,0
8	13	33,9	8,6	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0
8	13	67,8	22,1	60,1	31,3	31,3	8,3	9,3
8	13	101,7	39,4	107,5	35,5	40,0	34,8	35,8
9	12	33,9	8,6	24,6	0,0	0,0	2,1	0,0
9	12	67,8	20,0	57,0	20,2	25,0	20,3	15,7
9	12	101,7	39,0	111,2	27,2	37,0	50,6	46,0
10	11	33,9	8,7	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0
10	11	67,8	19,9	59,5	0,0	0,0	0,0	0,0
10	11	101,7	38,6	115,6	55,8	46,5	17,5	31,7

⁽¹⁾ Resultado das análises (Quadro 26); ⁽²⁾ Valor estimado em função do teor de argila das amostras de solo (Eq. 10); ⁽³⁾ 74,2% da produtividade esperada em cana soca; ⁽⁴⁾ Nível crítico de P no solo; ⁽⁵⁾ Dose de P a ser aplicada localizadamente ao lado das linhas da resoca; 6 - Dose de P sem considerar o efeito residual do P aplicado em cana soca.

Quadro 29. Doses de P a serem recomendadas para ressocas pelo SBNR-C estimando-se o efeito residual de P da dose recomendada para cana soca e sem considerar este efeito em solos com diferentes características químicas

Solo ⁽¹⁾	P-rem ⁽²⁾	PDE ⁽³⁾	NCr ⁽⁴⁾		Dose de P ⁽⁵⁾		Dose de P ⁽⁶⁾	
			Mehlich-1	Resina	Mehlich-1	Resina	Mehlich-1	Resina
	mg L ⁻¹	t ha ⁻¹	- mg dm ⁻³ -		kg ha ⁻¹			
1	42	25,2	8,4	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	42	50,3	20,3	24,2	7,1	4,0	9,0	1,2
1	42	75,5	36,1	44,4	14,2	12,5	24,9	17,3
2	34	25,2	7,2	10,2	0,0	0,0	0,0	0,0
2	34	50,3	17,6	24,9	0,0	0,0	0,0	0,0
2	34	75,5	32,5	45,8	1,8	0,0	0,0	0,0
3	28	25,2	6,6	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0
3	28	50,3	16,0	26,2	0,0	0,0	0,0	0,0
3	28	75,5	29,3	47,9	5,5	2,3	0,0	0,0
4	25	25,2	6,4	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0
4	25	50,3	15,3	27,3	0,0	5,2	0,0	3,2
4	25	75,5	27,9	49,7	10,3	14,6	8,3	21,2
5	21	25,2	6,2	12,4	3,6	3,0	5,4	3,0
5	21	50,3	14,5	29,2	10,7	9,6	18,9	16,4
5	21	75,5	26,3	52,9	21,5	19,6	37,8	35,3
6	18	25,2	6,1	13,6	0,0	0,0	0,0	0,0
6	18	50,3	14,1	31,4	2,3	0,0	0,0	0,0
6	18	75,5	25,3	56,3	14,5	9,1	17,4	0,0
7	16	25,2	6,0	14,6	4,4	3,3	7,0	2,8
7	16	50,3	13,8	33,2	12,4	10,7	21,9	17,7
7	16	75,5	24,7	59,3	25,6	21,9	42,8	38,6
8	13	25,2	6,1	16,6	0,0	0,0	0,0	0,0
8	13	50,3	13,5	36,8	0,0	1,4	0,0	0,0
8	13	75,5	23,9	65,2	15,2	16,3	15,9	17,3
9	12	25,2	6,1	17,5	0,0	0,0	0,0	0,0
9	12	50,3	13,4	38,3	9,4	8,3	14,0	7,5
9	12	75,5	23,7	67,7	25,5	21,0	37,5	30,9
10	11	25,2	6,2	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0
10	11	50,3	13,4	40,1	0,0	0,0	0,0	0,0
10	11	75,5	23,6	70,5	0,0	14,8	0,0	9,2

⁽¹⁾ Resultado das análises (Quadro 26); ⁽²⁾ Valor estimado em função do teor de argila das amostras de solo (Eq. 10); ⁽³⁾ 67,8 % da produtividade esperada em cana planta; ⁽⁴⁾ Nível crítico de P no solo; ⁽⁵⁾ Dose de P a ser aplicada localizadamente ao lado das linhas da soca; ⁽⁶⁾ Dose de P sem considerar o efeito residual do P aplicado em cana planta.

O NCr de P estimado para resina é, em média, duas vezes maior que pelo Mehlich-1 para os dez solos utilizados (Quadro 27). Entretanto forma, mesmo com níveis críticos maiores, as doses de P recomendadas quando o extrator é a Resina são, na maior parte dos casos, inferiores à doses recomendadas quando Mehlich-1 é o extrator utilizado (Quadros 27, 28 e 29).

Quando a Resina é o extrator de P, os níveis críticos diminuem quando o valor do P_{rem} aumenta (Figura 13 B), o que significa dizer que os níveis críticos de P são maiores em solos argilosos e intemperizados do que em solos arenosos, quando a Resina é o extrator utilizado para avaliar a disponibilidade desse nutriente. Isso ocorre porque, mesmo com uma menor demanda nutricional da cana em solos com maior capacidade tampão, a taxa de recuperação da planta diminui com o aumento dessa capacidade, fazendo com que a quantidade absorvível que deveria ter o solo para uma determinada produtividade esperada aumente, proporcionando maiores níveis críticos.

Em cana planta, a recomendação de P pelo SBNR-C para os solos utilizados nesta simulação (Quadro 26) comparada com as doses indicadas pelas tabelas de recomendação dos estados de Pernambuco e Minas Gerais (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998; RECOMENDAÇÕES PARA USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS, 1999), para o Mehlich-1, mostraram-se compatíveis e condizentes com a realidade. No entanto, o SBNR-C calcula sistematicamente doses um pouco menores, principalmente em baixas e médias produtividades esperadas.

O fato da maioria dos solos apresentarem uma boa disponibilidade de P pelas constantes aplicações de fertilizantes fosfatados, como é comum em solos intensivamente cultivados com cana-de-açúcar, teoricamente reduzem o poder tampão. Dessa forma, recomendações um pouco menores provavelmente se aproximem com mais exatidão na previsão de doses a recomendar de P.

A estimativa do efeito residual de P utilizado para recomendar fertilizantes sem os resultados de uma análise do solo mostra-se consistente em cana soca e ressocas (Quadros 28 e 29), quando se compara com as recomendações dos estados de São Paulo, Pernambuco e Minas Gerais (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA

O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996; RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998; RECOMENDAÇÕES PARA USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS, 1999). No entanto, em ressocas as recomendações do SBNR-C são, em média, 2 vezes menores do que em soca pelo decréscimo dos níveis críticos.

Por outro lado, se as produtividades esperadas em ressocas são menores do que em soca não é prudente manterem-se as mesmas recomendações para todas as rebrotas. É possível que a recomendação de P seja mais elevada, principalmente nas primeiras rebrotas; porém, o que o SBNR-C recomenda representa uma média para todas as ressocas por falta de dados experimentais para cada cultivo. Pesquisas futuras poderão gerar dados que possibilitem uma recomendação mais criteriosa de fertilizantes fosfatados em rebrotas.

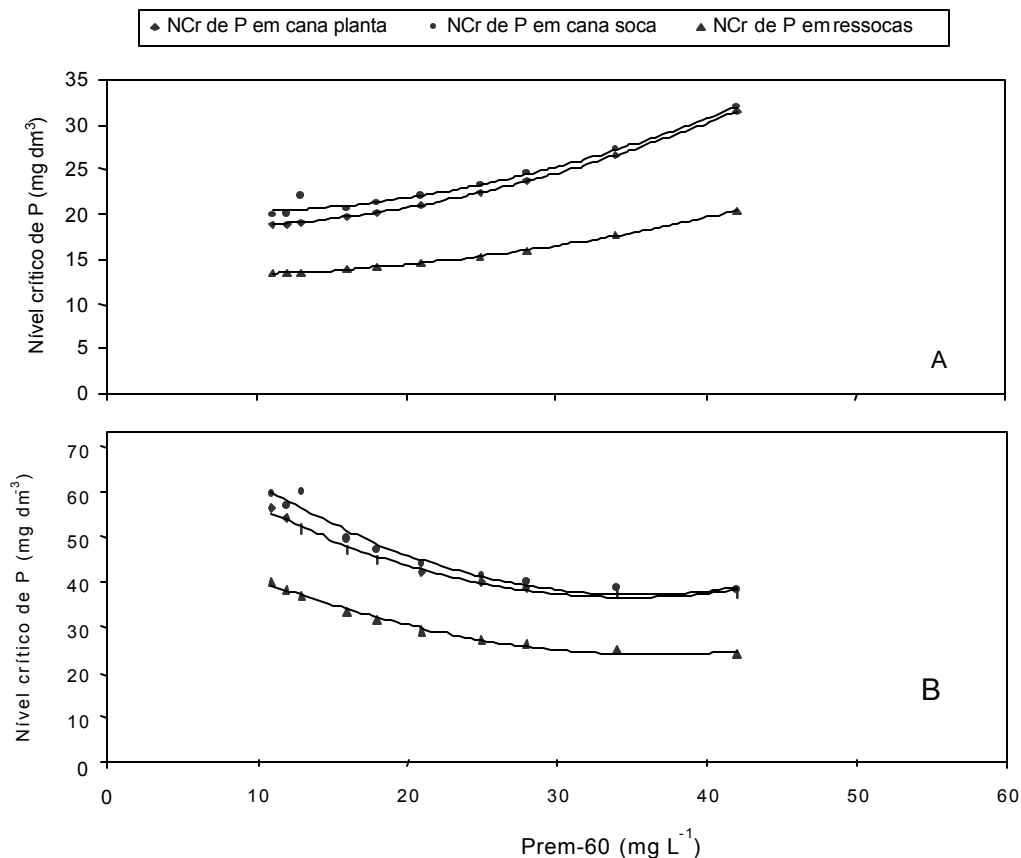


Figura 13. Nível crítico de P no solo em cana planta, soca e ressocas pelo Mehlich-1 (A) e pela Resina (B) em função do P-rem.

Vale salientar que o SBNR-C pode recomendar utilizando apenas a estimativa do efeito residual de P. É de se esperar que havendo análise do solo antes das rebrotas esta recomendação passe a ser mais elevada. Imagine-se, então, que o resultado da análise química do solo 1 tenha sido de $10,8 \text{ mg dm}^{-3}$ pelo Mehlich-1 (Quadro 26), em cana planta e também antes das rebrotas. Sendo assim, as doses a serem recomendadas em soca e ressocas seriam de, respectivamente, $38,1$ e $24,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de P, ou seja, 27 % maior em soca e 45 % em ressocas. Isto mostra que o SBNR-C é mais consistente sem a estimativa do efeito residual, até porque esta seria mais uma variável estimada dentro do modelo.

Em solos em que os teores disponíveis são elevados, como os solos 2, 3 e 10 (Quadro 26), as doses recomendadas pelo SBNR-C para cana soca, utilizando-se o efeito residual do P recomendado para cana planta, perde consistência prática, pois a dose de P recomendada em planta é pequena, o efeito residual também é pequeno; porém, como os níveis críticos em soca são elevados, a recomendação para um pequeno efeito residual é conseqüentemente elevada. Quando se considera, no entanto, a análise para aqueles solos, as doses recomendadas são consideravelmente menores, coerentes, portanto, com os elevados teores disponíveis de P.

4.3.7. Adubação com enxofre e com zinco

O S, apesar de exigido em quantidades elevadas pela cultura da cana-de-açúcar, principalmente quando comparada com a exigência de Mg (Quadro 3), não terá no SBNR-C uma adubação específica, sendo sua demanda suprida por fertilizantes nitrogenados e fosfatados que contenham S. Para solos que não necessitam correção de pH, mas sim de Ca, a utilização de gesso é também solução para essa deficiência.

Por outro lado, tem se intensificado o uso de vinhaça no manejo da agricultura canavieira, o que representa uma grande entrada de S. Mesmo assim, o SBNR-C disponibiliza alguns modelos, apesar dos poucos dados experimentais existentes até o momento que relacionem cana-de-açúcar com S, que podem ser utilizados para uma eventual recomendação deste nutriente. Por exemplo, para um solo com teor disponível de $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de S pelo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em $\text{HOAc } 2,0 \text{ mol L}^{-1}$,

30 mg L⁻¹ de P-rem e para uma produtividade de 100 t ha⁻¹, o SBNR-C recomenda uma dose de 69,7 kg ha⁻¹ de S, aplicada localizadamente no sulco de plantio.

Apesar da dificuldade para se obter informações necessárias para o ajuste de modelos preditivos para recomendar micronutrientes, desenvolveram-se algumas regressões para Zn que, pelo menos nesta primeira versão, mostraram-se consistentes e capazes de recomendar doses deste nutriente, compatíveis com as tabelas de recomendação de corretivos e fertilizantes para esta cultura (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996; RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998; RECOMENDAÇÕES PARA USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS, 1999).

Exemplificando, num solo de textura média, com um P-rem de 30 mg L⁻¹ e para uma produtividade de 150 t ha⁻¹, o SBNR-C recomenda 7,9 kg ha⁻¹ de Zn aplicado no sulco de plantio, num solo com 0,0 mg dm⁻³ de Zn pelo Melhich-1. Esta é uma recomendação dentro das expectativas experimentais, apesar das escassas informações sobre micronutrientes em cana-de-açúcar. Portanto, tanto para S como para micronutrientes, ficaram evidentes muitas lacunas da pesquisa.

4.4. Desenvolvimento do Sistema para nitrogênio

4.4.1. Estimativa do CUB de nitrogênio

O CUB de N é função apenas da produtividade esperada. Teoricamente, não há, característica física e, ou, química do solo que possa se relacionar significativamente com o CUB de N. Sua retenção pelo solo é fraca, fazendo com que seja facilmente lixiviado, reduzindo, conseqüentemente, seu aproveitamento pelas plantas. Entretanto, é um nutriente acumulado em quantidades elevadas pela cana-de-açúcar (Quadro 3).

Quadro 30. Equações do coeficiente de utilização biológico (CUB) de N (kg kg⁻¹) em função da produção de matéria seca de colmos, folhas e raízes de cana planta e soca (t ha⁻¹)

Componente	Equação	R ²
Cana planta		
• Colmo	$\hat{Y} = 454,34 - 4,8604^{**} X ; \forall X \text{ entre } 5 \text{ e } 50 \text{ t ha}^{-1}$	0,967

	$\hat{Y} = 430, \forall X \leq 5 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 212, \forall X \geq 50 \text{ t ha}^{-1}$	
• Folhas	$\hat{Y} = 249,27 - 3,9142^{**} X$; $\forall X$ entre 3,2 e 32 t ha^{-1} $\hat{Y} = 237, \forall X \leq 3,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 124, \forall X \geq 32 \text{ t ha}^{-1}$	0,851
• Raízes	$\hat{Y} = \bar{Y} = 420$	-
Cana soca		
• Colmo	$\hat{Y} = 284,90 - 2,9017^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1} $\hat{Y} = 275, \forall X \leq 3,4 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 187, \forall X \geq 33,9 \text{ t ha}^{-1}$	0,881
• Folhas	$\hat{Y} = 173,08 - 6,3711^{**} X$; $\forall X$ entre 2,2 e 21,7 t ha^{-1} $\hat{Y} = 159, \forall X \leq 2,2 \text{ t ha}^{-1}$ e $\hat{Y} = 35, \forall X \geq 21,7 \text{ t ha}^{-1}$	0,899

** Significativo a 1 %.

Os dados utilizados para o ajuste de modelos que relacionam CUB de N com produtividade em cana planta e soca nos colmos e folhas (Quadro 30) foram obtidos do trabalho de ORLANDO FILHO (1978).

Em raízes, além de não se encontrar nenhuma relação entre CUB de N e produtividade, dados de experimentos hidropônicos superestimam os teores deste nutriente nesta parte da planta, conseqüentemente, subestimando os valores do CUB. Assim, partindo-se do princípio de que a relação entre N e K na matéria seca da parte aérea de plantas de cana-de-açúcar é também mantida nas raízes, conhecendo-se o CUB de K, pode-se estimar o CUB de N.

O trabalho de ORLANDO FILHO (1978) mostra que a demanda de N na parte aérea da cana é, aproximadamente, 95 % da de K. Considerando-se que esta relação é mantida nas raízes, então, o CUB de N é 5 % maior do que o CUB de K, ou seja, como o CUB de K é de 400 kg kg^{-1} , o de N será de 420 kg de matéria seca de raízes produzidas por kg de N acumulado nesta parte da planta. Números como estes precisam ser confirmados em futuras versões.

4.4.2. Demanda de nitrogênio

O N é acumulado em grandes quantidades pela cana-de-açúcar, sendo, por isso, intensamente exportado nas colheitas, fazendo com que haja um elevado consumo de fertilizantes nitrogenados.

Por outro lado, como no caso do Ca, Mg e K, a demanda de N é função apenas da produtividade esperada, sem considerar-se a ciclagem

de N, devido a sua intensa volatilização provocada pela queima da cana durante a colheita.

Embora a matéria orgânica seja a principal fonte de N em solos minerais, relacionar CUB ou demanda de N com o teor de matéria orgânica, não é, ainda, uma função com a consistência necessária para que se possa desenvolver um modelo confiável. Desse modo, como a demanda de N é função apenas da produtividade esperada (pressuposição adotada), da mesma forma como foi considerado para K e P, é provável que haja uma diferença considerável na demanda de N em cana planta, soca e ressocas (Quadro 31), permitindo, então, uma diferenciação na recomendação de fertilizantes nitrogenados para estes três tipos de cultivo.

De fato, com o decréscimo natural de produtividade com os cultivos sucessivos, a demanda de N tende a diminuir da cana planta até as ressocas. Esta diminuição não ocorre com o K. O que provavelmente ocorre com o N é que os CUB de cana planta, soca e ressocas diminuem com os cultivos sucessivos, só que esta diminuição é gradual e como a produtividade também diminui proporcionalmente, a demanda tende a ser menor.

A estimativa da demanda de N para os cultivos de cana planta, soca e ressocas é obtida ajustando-se os dados do quadro 31 em modelos contínuos que relacionam a demanda de N com a produtividade esperada (Quadro 32).

Quadro 31. Demanda de nitrogênio para formação de colmos (C), de folhas (F) e de raízes (R) em cana planta, colmos e folhas em cana soca e ressocas para diferentes produtividades esperadas de colmos frescos para cana planta

FDE	Cana planta				DT ⁽¹⁾	FDE ⁽²⁾	Cana soca			DT ⁽³⁾	FDE ⁽⁴⁾	Ressoca			DT ⁽⁵⁾
	C	F	R				C	F				C	F		
t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹			t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹			t ha ⁻¹		
20	11,6	13,5	2,9	28,0	13,6	12,3	13,6	25,9	10,1	9,1	9,9	19,0			
40	24,6	28,6	5,7	58,9	27,1	25,6	29,9	55,5	20,1	18,6	26,5	45,1			
60	39,4	45,3	8,6	93,3	40,7	39,9	49,3	89,2	30,2	28,7	34,1	62,8			
80	56,0	64,3	11,4	131,7	54,2	55,3	73,6	128,9	40,3	39,3	45,8	85,1			
100	75,1	85,6	14,3	175,0	67,8	71,8	104,3	176,1	50,3	50,7	66,0	116,7			
120	97,4	110,3	17,1	224,8	81,3	90,0	144,7	234,7	60,4	62,7	87,0	149,7			
140	123,2	138,3	20,0	281,5	94,9	109,9	199,9	309,8	70,5	75,3	111,7	187,0			
160	153,8	171,8	22,9	348,5	108,5	131,6	279,8	411,4	80,5	89,1	141,5	230,6			
180	190,7	211,8	25,7	428,2	122,0	155,6	398,4	554,0	90,6	103,4	179,0	282,4			
200	237,0	258,1	28,6	523,7	135,6	181,2	619,7	800,9	100,7	118,7	230,1	348,8			

⁽¹⁾Total da demanda de N para cana planta; ⁽²⁾67,8 % da produtividade esperada de colmos frescos da cana planta; ⁽³⁾Total da demanda de N para cana soca; ⁽⁴⁾74,2 % da produtividade esperada de colmos frescos da cana soca, considerando a média de produtividade de todas as ressocas; ⁽⁵⁾Total da demanda de N para qualquer que seja a ressoca.

Quadro 32. Demanda de N para os cultivos de cana planta, soca e ressocas (kg ha⁻¹) em função da produtividade esperada (t ha⁻¹)

Equação	R ²
Cana planta ⁽¹⁾	
$\hat{Y} = 19,07 + 0,5764^{**} X + 0,0095^{**} X^2; \forall X \text{ entre } 20 \text{ e } 200 \text{ t ha}^{-1}$	0,999
Cana soca	
$\hat{Y} = 82,85 - 2,6953^{*} X + 0,0561^{**} X^2; \forall X \text{ entre } 13,6 \text{ e } 135,6 \text{ t ha}^{-1}$	0,984
Ressoca	
$\hat{Y} = 16,31 + 0,6556^{*} X + 0,0257^{**} X^2; \forall X \text{ entre } 10,1 \text{ e } 100,7 \text{ t ha}^{-1}$	0,998

⁽¹⁾ Para $\forall X \leq 20$ e $\geq 200 \text{ t ha}^{-1}$, substituem-se estas produtividades na regressão e obtêm-se as demandas. Em soca e ressocas, para produtividades fora do intervalo representado nas regressões, procede-se como para cana planta;

* e ** Significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

4.4.3. Taxa de recuperação de nitrogênio pela planta

Dados de CARNAÚBA (1989), trabalhando com eficiência de utilização de N em condições de campo, mostraram uma variação na taxa de recuperação de 70 e 80 % em plantas de cana-de-açúcar.

Com N, assim como, com Ca, Mg e K, a medida em que se aumentam as doses aplicadas ao solo, a taxa de recuperação diminui gradativamente, o que permitiu ajustar-se um modelo linear decrescente:

$$\hat{Y} = 0,89 - 0,00007^{**} X; (R^2 = 0,889) \quad (\text{Eq. 24})$$

$$\forall X \text{ entre } 25 \text{ e } 1.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

em que \hat{Y} é a taxa de recuperação de N (kg ha⁻¹/kg ha⁻¹). Para doses fora do intervalo da equação, substituem-se os limites indicados na regressão e obtêm-se a taxa de recuperação de N; X é a dose de N aplicada (kg ha⁻¹).

4.4.4. Disponibilidade de nitrogênio

A disponibilidade de N no solo é resultante do balanço entre os processos microbiológicos de mineralização e imobilização (CANTARUTTI, 1996). Sob uma visão físico-química, ela depende das inter-relações entre os fatores quantidade (N lábil da reserva de N na forma orgânica), capacidade (taxa de mineralização) e intensidade (N na forma inorgânica).

Muitas pesquisas têm sido feitas ao longo dos anos na tentativa de desenvolver índices que permitam estimar a capacidade de suprimento de N dos solos de forma simples e eficiente (KINJO et al., 1978; POTTKER & TEDESCO, 1979; SALCEDO et al., 1985; LEMOS et al., 1988; PARENTONI et al., 1988; CAMARGO et al., 1997).

STANFORD & SMITH (1972), partindo da premissa de que apenas uma fração do N total do solo é mineralizado, observaram que este fenômeno segue cinética de primeira ordem, ou seja:

$$dN/dt = -kN$$

em que $N = N_0 - N_t$, e N_0 é o N potencialmente mineralizável em mg dm^{-3} ; N_t é o N mineralizado até o tempo t em mg dm^{-3} ; k é a constante de mineralização por semana.

Com isso, pode-se estimar duas variáveis básicas: a quantidade de N passível de ser mineralizada (N_0) e a taxa de mineralização de N (k). O índice N_0 seria o fator quantidade e k , o fator capacidade. O fator intensidade definido por CANTARUTTI (1996) poderia ser determinado por um extrator, como o fez OLIVEIRA (1987). No entanto, pelo menos para esta primeira versão, considera-se que esta quantidade de N é desprezível diante do N lábil em forma orgânica.

Para estimar o N_0 , ajustou-se um modelo de regressão binomial, considerando como variáveis independentes os teores de matéria orgânica e argila do solo, utilizando dados de OLIVEIRA (1987), conforme o modelo:

$$\hat{Y} = 0,000012 + 0,0000134166**X + 0,000000633142**Z \quad (\text{Eq. 25})$$

$$(R^2 = 0,992), \forall X \text{ entre } 0,5 \text{ e } 10,0 \text{ dag kg}^{-1} \text{ e } \forall Z \text{ entre } 5 \text{ e } 75 \%$$

em que \hat{Y} é o N potencialmente mineralizável (mg dm^{-3}); X é o teor de matéria orgânica do solo (dag kg^{-1}); Z é o teor de argila do solo (%).

O teste de simulação do ajuste deste modelo permite inferir que solos com elevados teores de matéria orgânica não devem ser, provavelmente, solos arenosos, assim como solos argilosos, possivelmente, não devem ter baixos teores de matéria orgânica. Embora estas situações não sejam absolutas, é evidente que o modelo perde consistência, principalmente pela não significância da interação.

No entanto, nesta primeira versão, foi possível encontrar uma relação significativa entre N potencialmente mineralizável e os teores de matéria orgânica e de argila.

Como apenas uma fração do N_{total} é mineralizável, é preciso conhecer o valor desta fração, para que se possa calcular o suprimento de N do solo. Para isso, utilizando os dados dos mesmos solos que permitiram o ajuste do modelo descrito, a relação média N_0/N_{total} é de 0,0634. Portanto, 6,34 % do N_{total} será mineralizado.

SALCEDO et al. (1985), estudando a mineralização do C e do N em cana planta, determinaram que a constante de mineralização (k) para este cultivo foi de $0,074 \text{ semana}^{-1}$, tanto em solos fertilizados com N como em solos que não receberam adubos nitrogenados.

O fato da cana soca e ressecas apresentarem respostas mais freqüentes que a cana planta à fertilização nitrogenada (CAVALCANTI et al., 1979b; LIMA JÚNIOR, 1982) poderia ser explicado pela redução no teor de N na forma mineral no perfil do solo ao final do ciclo da cana planta (SALCEDO & SAMPAIO, 1984b), aliada à possível queda na taxa de mineralização de N em forma orgânica com o decorrer deste ciclo.

Estima-se que haja uma redução de 30 % na taxa de mineralização entre a cana planta e a soca e de 25 % entre a cana soca e as ressecas. Assim, conhecendo-se a taxa de mineralização da cana planta, pode-se estimar esta taxa para soca e ressecas. Como a taxa de mineralização da cana planta é de $0,074 \text{ semana}^{-1}$, a da soca será de $0,052 \text{ semana}^{-1}$ e a das ressecas de $0,039 \text{ semana}^{-1}$. Estas reduções possivelmente expliquem a redução de produtividade entre esses cultivos. No entanto, como as exigências nutricionais da cana são muito variadas, é possível que, além do N, muitos outros fatores estejam envolvidos nesta redução de produtividade.

Para compor o modelo que irá prever a disponibilidade de N pelo solo, é necessário saber por quanto tempo plantas de cana-de-açúcar absorvem N. Para isto, os dados de ORLANDO FILHO (1978), CARNAÚBA (1989) e CAMARGO (1989) sugerem que, em cana planta, a absorção de N se dá até os 8 meses, ou seja, 32 semanas após o plantio. Para cana soca, a absorção só é expressiva até o sexto mês, ou seja, 24 semanas após a rebrota. A falta de dados para ressocas faz com que se considere que a absorção de N apresente o mesmo comportamento da soca. Assim, é possível que com 24 semanas, todo o N necessário para uma determinada produtividade, tenha sido absorvido.

Nesta primeira versão do SBNR-C, o modelo de STANFORD & SMITH (1972) é utilizado para estimar o N disponível do solo, mesmo tendo sido necessária a sua adaptação para estimar o N potencialmente mineralizável:

$$N_{\text{disponível}} = (3.000.000 \times N_0 \times 0,0634) \times e^{(0,074)(32)}, \text{ para cana planta (Eq. 26)}$$

$$N_{\text{disponível}} = (3.000.000 \times N_0 \times 0,0634) \times e^{(0,052)(24)}, \text{ para cana soca (Eq. 27)}$$

$$N_{\text{disponível}} = (3.000.000 \times N_0 \times 0,0634) \times e^{(0,039)(24)}, \text{ para ressocas (Eq. 28)}$$

em que $N_{\text{disponível}}$ é dado em kg ha^{-1} , considerando que o suprimento de N é proveniente de uma camada de solo de até 30 cm de profundidade; N_0 é o N potencialmente mineralizável, em mg dm^{-3} , estimado em função do teor de matéria orgânica (dag kg^{-1}) e argila do solo (%), conforme modelo descrito (Eq. 25); 0,0634 é a fração do N_{total} da matéria orgânica do solo (N_0/N_{total}) potencialmente mineralizável, expressa em $\text{mg dm}^{-3}/\text{mg dm}^{-3}$; e é a base do logaritmo neperiano; 0,074, 0,052 e 0,039 são as constantes de mineralização (k), expressas em semana^{-1} , para cana planta, soca e ressocas, respectivamente; 32 e 24 são os tempos em semanas em que os cultivos de cana planta e soca, respectivamente, absorvem N. Em ressocas, considera-se o mesmo tempo de absorção da soca.

Para exemplificar, imagine que se deseja conhecer o suprimento de N a uma profundidade de até 30 cm e para um cultivo de cana planta em um solo com $2,0 \text{ dag kg}^{-1}$ de matéria orgânica e 35 % de argila. De acordo com os modelos descritos, a disponibilidade de N para esta condição é de 124 kg ha^{-1} , para um período de absorção de 32 semanas. Embora o N

seja muito extraído em qualquer cultivo da cana-de-açúcar, o retorno de N no final do ciclo é, teoricamente, desprezível pela prática da queimada na colheita. Mesmo que haja alguma entrada de N oriunda dos restos culturais, considera-se que essa entrada será utilizada para formação de novas raízes e rebrota dos perfilhos.

Em São Paulo, muitas evidências apontam para uma redução drástica na prática da queima da cana e, a médio prazo, este tipo de manejo deverá deixar de existir. Neste caso, versões futuras do SBNR-C deverão considerar e computar este suprimento de N, com redução no uso de fertilizantes nitrogenados.

Por outro lado, muitos trabalhos têm relatado a existência de associações de gramíneas tropicais com bactérias fixadoras de N (N_2), as quais em condições favoráveis podem contribuir significativamente para a demanda de N (RINAUDO, 1971; DÖBEREINER et al., 1972; DÖBEREINER & DAY, 1975; BÜLOW & DÖBEREINER, 1975). No entanto, nesta primeira versão, pelos poucos dados sobre o suprimento de N, não será considerada esta fonte, mesmo porque as pesquisas se resumem mais em isolar e identificar as bactérias fixadoras de N_2 , do que quantificar este suprimento. Certamente, porém, no futuro, esta deverá ser uma linha de pesquisa que trará ao cultivo da cana-de-açúcar benefícios quanto a economia na fertilização nitrogenada.

4.4.5. Adubação nitrogenada

O N, assim como o K, é um nutriente muito absorvido e acumulado pela cultura da cana-de-açúcar. No entanto, esse acúmulo não se diferencia tanto em cana planta e soca como para o K, mesmo considerando um decréscimo natural de produção entre esses cultivos, como discutido. A diferença de demanda só é mais pronunciada em ressocas, dada a uma reduzida produtividade esperada neste cultivo do que a uma menor demanda nutricional.

Como o K, a mais elevada demanda da soca promove maior recomendação deste nutriente. Como a demanda de N da soca se equivale à demanda da cana planta, o que poderia fazer com que as recomendações de N da soca fossem muito mais elevadas do que em planta? É provável que esta resposta tenha muito a ver com a disponibilidade do N antes do

plantio da cana planta e o período que antecede à rebrota da soca. Para alguns pesquisadores (CAVALCANTI et al., 1979b; LIMA JÚNIOR, 1982; SALCEDO & SAMPAIO, 1984b), isso poderia ser explicado pela redução no teor de N em forma mineral no perfil do solo ao final do ciclo da cana planta, aliado à possível queda na taxa de mineralização de N de formas orgânicas no decorrer deste ciclo.

Em ressocas, como comentado para P e K, é mais prudente diferenciar-se também a recomendação de N pelas menores produtividades alcançadas por este cultivo e, conseqüentemente, menor demanda nutricional.

Para simular como o SBNR-C recomenda N para esta cultura, são utilizados os resultados da análise do solo 1 (Quadro 12). A simulação da recomendação consistiu em avaliar as doses recomendadas de N para produtividades em torno de 80 t ha⁻¹ e acima de 120 t ha⁻¹ de colmos. Nos resultados das análises (Quadro 12) não consta o teor de argila dos solos, necessário para estimar o N potencialmente mineralizável. Como se trata apenas de uma simulação, estimou-se o teor de argila pelo P-rem (Eq. 10).

No exemplo, tomaram-se 120 t ha⁻¹ de colmos como produtividade esperada em cana planta. Portanto, a produtividade esperada em soca e ressoca será de, respectivamente, 81,4 e 60,4 t ha⁻¹. Desse modo, estimaram-se as demandas em cana planta, soca e ressoca (Quadro 32):

$$\text{Demanda de N em cana planta (120 t ha}^{-1}\text{)} = 225,0 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Demanda de N em cana soca (81,4 t ha}^{-1}\text{)} = 235,2 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Demanda de N em ressoca (60,4 t ha}^{-1}\text{)} = 149,7 \text{ kg ha}^{-1}$$

Estas demandas correspondem às quantidades que as plantas deverão absorver e acumular. Para realizar o balanço de N no sistema solo-planta é preciso, primeiramente, conhecer o suprimento de N do solo para cana planta, soca e ressoca. Assim, duas variáveis devem ser informadas: o teor de matéria orgânica e de argila do solo. Dessa forma, estima-se o N potencialmente mineralizável (N₀) (Eq. 25):

$$\text{N potencialmente mineralizável (N}_0\text{)} = 0,000087439124 \text{ mg dm}^{-3}$$

Estimado, então o N_0 , o SBNR-C calcula o $N_{\text{disponível}}$ em cana planta, soca e ressoca até uma profundidade de 30 cm do perfil do solo (Eq. 26, 27, e 28), encontrando os resultados:

$$N_{\text{disponível}} (\text{cana planta}) = 177,5 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$N_{\text{disponível}} (\text{cana soca}) = 57,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$N_{\text{disponível}} (\text{ressoca}) = 42,4 \text{ kg ha}^{-1}$$

Estas são as quantidades de N que o solo deve suprir para os três cultivos.

Calculadas as quantidades que o solo deveria ter e o que o solo tem deste nutriente disponível (suprimento), o balanço é estabelecido:

$$\text{Balanço de N na cana planta} = 225,0 - 177,5 = 47,5 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Balanço de N na cana soca} = 235,2 - 57,9 = 177,3 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Balanço de N na ressoca} = 149,7 - 42,4 = 107,3 \text{ kg ha}^{-1}$$

Como o balanço foi positivo, para conhecer a dose de N a ser recomendada, divide-se o resultado deste balanço pela taxa de recuperação de N pela planta. Assim, é preciso determinar, primeiro, a taxa de recuperação de N em cana planta, soca e ressoca (Eq. 24):

$$\text{Taxa de recuperação de N em cana planta} = 0,87 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

$$\text{Taxa de recuperação de N em cana soca} = 0,87 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

$$\text{Taxa de recuperação de N em ressoca} = 0,88 \text{ kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$$

Dessa forma, as doses de N recomendadas e aplicadas localizadamente em cana planta, soca e ressoca são:

$$\text{Dose de N para cana planta} = \frac{47,5}{0,87} = 54,6 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Dose de N para cana soca} = \frac{177,3}{0,87} = 203,8 \text{ kg ha}^{-1}$$

$$\text{Dose de N para ressoca} = \frac{107,3}{0,88} = 121,9 \text{ kg ha}^{-1}$$

Resultados de outras simulações são apresentados no quadro 33.

Quadro 33. Suprimento de N do solo (SPM) e doses a serem recomendadas para cana planta, soca e ressorcas pelo SBNR-C em solos com diferentes características químicas

Solo ⁽¹⁾	PDE ⁽²⁾	Mat. Org.	Argila ⁽³⁾	SPM de N ⁽⁴⁾			Dose de N ⁽⁵⁾		
				Planta	Soca	Ressorca	Planta	Soca	Ressorca
	t ha ⁻¹	dag kg ⁻¹	%	kg ha ⁻¹					
1	80	3,49	45	177,5	57,9	42,4	0,0	49,6	47,6
1	120	3,49	45	177,5	57,9	42,4	54,6	203,8	121,9
2	80	3,76	65	210,6	68,7	50,3	0,0	37,3	38,6
2	120	3,76	65	210,6	68,7	50,3	17,1	190,6	113,2
3	80	3,49	67	205,8	67,2	49,2	0,0	39,1	39,9
3	120	3,49	67	205,8	67,2	49,2	22,6	192,4	114,5
4	80	4,54	65	231,9	75,6	55,4	0,0	29,5	32,8
4	120	4,54	65	231,9	75,6	55,4	0,0	182,7	107,5
5	80	4,73	70	243,5	79,4	58,1	0,0	25,2	29,7
5	120	4,73	70	243,5	79,4	58,1	0,0	178,3	104,3
6	80	5,10	46	222,7	72,7	53,2	0,0	32,9	35,3
6	120	5,10	46	222,7	72,7	53,2	3,2	186,1	109,9
7	80	4,70	75	249,1	81,3	59,5	0,0	23,1	28,2
7	120	4,70	75	249,1	81,3	59,5	0,0	176,2	102,7
8	80	2,71	52	165,3	53,9	39,5	0,0	54,1	50,9
8	120	2,71	52	165,3	53,9	39,5	69,1	207,6	125,6
9	80	1,26	5	65,4	21,3	15,6	69,3	91,2	78,0
9	120	1,26	5	65,4	21,3	15,6	183,8	245,1	152,8
10	80	3,49	69	208,4	68,0	49,8	0,0	38,2	39,2
10	120	3,49	69	208,4	68,0	49,8	19,6	191,5	113,8

⁽¹⁾ Os solos 1, 3, e 10 apesar de apresentarem o mesmo teor de matéria orgânica, apresentam diferentes teores de argila, o que proporciona diferentes suprimentos de N; ⁽²⁾ Produtividade esperada em cana planta. Em cana soca, a produtividade esperada deverá ser 67,8 % da cana planta e em ressorcas de 74,2 % da cana soca (Eq. 1); ⁽³⁾ Teor de argila estimado pelo P-rem (Eq. 10); ⁽⁴⁾ Suprimento de N do solo; ⁽⁵⁾ Dose de N a ser aplicada no sulco de plantio e, ou, em cobertura na linha das rebrotas.

O elevado suprimento de N em cana planta representa forte indicação das baixas respostas à adubação nitrogenada neste cultivo, principalmente em solos mais argilosos e, ou, com altos teores de matéria orgânica.

Solos com os mesmos teores de matéria orgânica, porém com diferentes texturas, como os solos 1, 3 e 10, apresentam suprimentos diferenciados de N, sendo os maiores suprimentos para aqueles mais argilosos.

Doses mais elevadas de N em socas, principalmente para altas produtividades, explicam-se pela elevada demanda nutricional aliada ao baixo suprimento de N, que se deve, provavelmente, ao curto período de tempo entre o corte da cana planta e os seis meses em que a soca apresenta a mais intensa absorção deste nutriente, resultando numa menor mineralização e menor disponibilidade.

A diferença no suprimento de N entre soca e ressoca é, provavelmente, devido à intensidade do cultivo com os cortes sucessivos, provocando maior adensamento do solo e menor aeração, reduzindo a atividade microbiana e a taxa de mineralização de N.

As baixas produtividades em rebrotas sucessivas fazem com que as demandas também o sejam, o que sugere baixas recomendações de N. Isto torna-se de fundamental importância à medida em que se recomendam as mesmas doses deste nutriente em qualquer que seja a rebrota (RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO E CALAGEM PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1996; RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998; RECOMENDAÇÕES PARA USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS, 1999). Utilizar 150 a 200 kg ha⁻¹ de N numa ressoca de quinto ou sexto corte parece inadequado para um cultivo onde a demanda é muito reduzida, dadas as produtividades obtidas.

Como grande parte da produção de cana é proveniente de rebrotas, pesquisas na área de fertilidade para estes cultivos deverão esclarecer como executar corretamente um programa diferenciado de adubação para cada ressoca.

4.5. Desenvolvimento do Sistema para micronutrientes

4.5.1. Estimativa dos CUB de boro, de cobre, de ferro e de manganês

Para estimar os CUB dos micronutrientes, considera-se a matéria seca de toda a planta (ORLANDO FILHO, 1978). Isso se deve à falta de informações para se estimar o CUB de micronutrientes em colmos e folhas separadamente. Em versões futuras, a pesquisa deverá gerar dados que complementem as informações existentes.

Com exceção do Zn, os CUB de B, Cu, Fe e Mn (Quadro 34) são função apenas da produtividade esperada, assim como foi para Ca, Mg, K e N.

Quadro 34. Equações dos coeficientes de utilização biológica (CUB) de B, Cu, Fe e Mn (kg g^{-1}) em função da produção de matéria seca em cana planta e soca (t ha^{-1})

Cultivo	Equação	R ²
Boro		
• Cana planta ⁽¹⁾	$\hat{Y} = 216,22 - 0,6247^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha^{-1}	0,927
• Cana soca	$\hat{Y} = 357,96 - 1,2497^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1}	0,921
Cobre		
• Cana planta	$\hat{Y} = 196,90 - 0,8767^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha^{-1}	0,963
• Cana soca	$\hat{Y} = 165,14 - 0,9903^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1}	0,979
Ferro		
• Cana planta	$\hat{Y} = 31,67 - 0,4230^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha^{-1}	0,874
• Cana soca	$\hat{Y} = 28,63 - 0,6719^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1}	0,931
Manganês		
• Cana planta	$\hat{Y} = 56,45 - 0,5184^{**} X$; $\forall X$ entre 5 e 50 t ha^{-1}	0,934
• Cana soca	$\hat{Y} = 57,82 - 0,8082^{**} X$; $\forall X$ entre 3,4 e 33,9 t ha^{-1}	0,973

⁽¹⁾ Para $\forall X \leq 5$ e $\geq 50 \text{ t ha}^{-1}$, substituem-se estas produtividades nas regressões e obtêm-se os CUBs. Nas regressões que estimam CUB em cana soca, o procedimento também é o mesmo.

** Significativo a 1%.

Pelos valores dos CUB, a cana-de-açúcar acumula mais Fe e Mn e menos B e Cu. Por outro lado, as mais comuns deficiências de

micronutrientes em cana são de Cu e Fe, principalmente em solos arenosos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste.

4.5.2. Demanda de boro, de cobre, de ferro e de manganês

A demanda dos micronutrientes é estimada para formação de toda a biomassa da planta para uma determinada produtividade e para qualquer solo, independentemente do poder tampão do solo (Quadro 35).

Quadro 35. Demanda de B, Cu, Fe e Mn (g ha^{-1}) em cana planta e soca em função da produtividade esperada (t ha^{-1})

Cultivo	Equação	R ²
Boro		
• Cana planta ⁽¹⁾	$\hat{Y} = 0,39 + 1,1345^{**}X + 0,0011^{**}X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha^{-1}	0,999
• Cana soca	$\hat{Y} = 0,58 + 0,6908^{**}X + 0,0007^{**}X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha^{-1}	0,999
Cobre		
• Cana planta	$\hat{Y} = 1,37 + 1,2017^{**}X + 0,0021^{**}X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha^{-1}	0,999
• Cana soca	$\hat{Y} = 1,80 + 1,4578^{**}X + 0,0031^{**}X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha^{-1}	0,999
Ferro		
• Cana planta	$\hat{Y} = 2.708,23 - 851,3^{*}X^{0,5} + 69,5367^{*}X$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha^{-1}	0,970
• Cana soca	$\hat{Y} = 3.836,65 - 1.427,22^{*}X^{0,5} + 132,303^{*}X$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha^{-1}	0,948
Manganês		
• Cana planta	$\hat{Y} = 40,60 + 2,5575^{*}X + 0,0273^{**}X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha^{-1}	0,999
• Cana soca	$\hat{Y} = 35,51 + 2,2845^{*}X + 0,0422^{**}X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha^{-1}	0,999

⁽¹⁾ Para $\forall X \leq 20$ e $\geq 200 \text{ t ha}^{-1}$, substituem-se estas produtividades na regressão e obtêm-se as demandas. Em soca, para produtividades fora do intervalo representado nas regressões, procede-se como para cana planta.

* e ** Significativos a 5 e 1%, respectivamente.

4.5.3. Taxa de recuperação de boro e de cobre pela planta

Dados de ANDRADE (1990) sugerem taxas de recuperação de B entre 5 e 15 % e de Cu entre 5 e 10 %. Assim, ajustaram-se modelos que relacionam a taxa de recuperação da planta em função de doses de B e Cu aplicadas ao solo (Quadro 36).

Informações disponíveis não permitem o ajuste de modelos quanto à taxa de recuperação de Fe e Mn em cana-de-açúcar, impossibilitando, nessa versão, a modelagem para recomendação destes micronutrientes.

Quadro 36. Taxas de recuperação da cana-de-açúcar para boro e cobre ($\text{kg ha}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$) em função de doses aplicadas ao solo (kg ha^{-1})

Equação ⁽¹⁾	R ²
$\hat{Y}_B = 0,14 - 0,3488^{**}X ; \forall X \text{ entre } 0,009 \text{ e } 0,28 \text{ kg ha}^{-1}$	0,969
$\hat{Y}_{Cu} = 0,10 - 0,1418^{**}X ; \forall X \text{ entre } 0,009 \text{ e } 0,35 \text{ kg ha}^{-1}$	0,970

⁽¹⁾ Para doses aplicadas fora do intervalo das equações, substituem-se os limites indicados nas regressões e obtêm-se as taxas de recuperação.

** Significativo a 1 %.

4.5.4. Disponibilidade de boro e de cobre

A avaliação da disponibilidade de micronutrientes do solo é ainda pouco pesquisada. Especificamente no caso da cana-de-açúcar e em solos pobres da região Nordeste, é comum o aparecimento de deficiências, principalmente de Cu, Fe e Zn, o que torna necessário buscar conhecimentos sobre extratores do disponível destes nutrientes.

Para o ajuste do modelo para B recuperado em função do B aplicado, utilizaram-se dados de RIBEIRO & TUKUNANGO SARABIA (1984) e FERREIRA (1998), em que a avaliação da disponibilidade de B foi realizada com água quente, conforme modelo:

$$\hat{Y} = 0,33 + 0,2458^{**}X ; (R^2 = 0,850) \quad (\text{Eq.29})$$

$$\forall X \text{ aplicado} \leq 10 \text{ kg ha}^{-1}$$

em que \hat{Y} é o B recuperado (mg dm^{-3}); X é o B aplicado (kg ha^{-1}).

Para Cu, utilizaram-se dados de GALRÃO (1999), ajustando-se o modelo:

$$\hat{Y} = 0,29 + 0,49^{**}X; (R^2 = 0,930) \quad (Eq.30)$$

$$\forall X \text{ aplicado} \leq 10 \text{ kg ha}^{-1}$$

em que \hat{Y} é o Cu recuperado (mg dm^{-3}); X é o Cu aplicado (kg ha^{-1}).

A simulação da recomendação para B e Cu mostraram níveis críticos variando de 0,4 a 1,7 mg dm^{-3} para B e 0,4 a 3,4 mg dm^{-3} para Cu em produtividades esperadas de 20 até 200 t ha^{-1} , corroborando com resultados experimentais mencionados por LOPES & CARVALHO (1988).

4.6. Sustentabilidade do cultivo da cana-de-açúcar

Introduzida no Brasil em 1502 e largamente cultivada já em 1550 nas regiões litorâneas do Nordeste, o cultivo da cana-de-açúcar tem se sustentado a quase 500 anos. Essa sustentabilidade está assentada em solos intemperizados e de baixa fertilidade natural, como os Latossolos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste e os dos Cerrados do Planalto Central. Segundo NOVAIS & SMYTH (1999), o solo é o componente de maior envolvimento, direto ou indireto, nessas premissas de sustentabilidade da agricultura.

Atualmente, com o aumento de preços do álcool no mercado e o aumento das exportações de açúcar, fala-se em safras recordes. Isso significa que novamente se intensificou o cultivo da cana-de-açúcar. É provável que durante todos esses anos com o cultivo intensivo da cana, grande parte das reservas nutricionais do solo tenham se exaurido. O que então manteria este Sistema ainda produtivo? O uso de corretivos e fertilizantes parece ser a resposta mais evidente; a agricultura canavieira consome 16,3 % dos fertilizantes comercializados no Brasil (RAMOS, 1999).

Neste sentido, sugere-se que as doses recomendáveis para atender demandas nutricionais de produtividades estabelecidas sejam acrescidas de doses suplementares que proporcionem sustentabilidade ao cultivo, de modo a não permitir a gradual exaustão do solo.

4.6.1. Estimativa das doses que viabilizem o cultivo sustentável

A dose suplementar corresponde à composição do que foi absorvido, acumulado e exportado nos colmos para uma dada produtividade.

Como o que vai ser exportado no colmo da cana planta, soca e ressoca para diferentes produtividades é definido pela demanda deste componente da planta, então a transformação dessa quantidade demandada pode ser definida como dose suplementar. Assim, as quantidades de Ca, Mg e K nos colmos de cana planta, soca e ressoca para diferentes produtividades totalizam tudo que será exportado nestes cultivos.

Para definição das doses suplementares, ajustaram-se modelos que relacionam quantidades de Ca, Mg e K que são exportadas do solo em função da produtividade (Quadro 37).

Para P, a dose suplementar depende não só da produtividade, mas, também, de capacidade tampão (P-rem). Isto significa que solos intemperizados e mais argilosos, em que a demanda é menor, a expectativa é a de que se utilizem doses suplementares menores. Para estimar essas doses (Quadro 38), ajustaram-se regressões, utilizando como variáveis independentes a produtividade e o P-rem.

Para exemplificar, imagine-se que se pretende conhecer a dose suplementar de Ca, Mg, K, e P que deverá ser aplicada a um solo com 40 mg L⁻¹ de P-rem num cultivo de cana planta e para uma produtividade de 100 t ha⁻¹. Utilizando os modelos descritos (Quadros 37 e 38), estima-se que essas doses serão de 71,4, 47,1, 76,1 e 18,5 kg ha⁻¹, respectivamente. Para estas mesmas condições, porém, em outro solo com 10 mg L⁻¹ de P-rem, a dose suplementar de P estimada é de 11,0 kg ha⁻¹.

Quadro 37. Equações que relacionam as doses suplementares de Ca, Mg e K (kg ha⁻¹) em cana planta, soca e ressoca em função da produtividade esperada (t ha⁻¹)

Nutriente	Equação	R ²
Cana planta		
Ca ⁽¹⁾	$\hat{Y} = 9,24 + 0,1721 * X + 0,0045 ** X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha ⁻¹	0,999

Mg	$\hat{Y} = 13,99 - 0,1986^0X + 0,0053^{**}X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha ⁻¹	0,995
K	$\hat{Y} = 10,70 + 0,1436^0X + 0,0051^{**}X^2$; $\forall X$ entre 20 e 200 t ha ⁻¹	0,998
Cana soca		
Ca	$\hat{Y} = 1,51 + 0,2146^{**}X + 0,0011^{**}X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha ⁻¹	0,999
Mg	$\hat{Y} = 1,62 + 0,2129^{**}X + 0,0011^{**}X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha ⁻¹	0,999
K	$\hat{Y} = 4,18 + 0,4766^{**}X + 0,0026^{**}X^2$; $\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha ⁻¹	0,999
Ressoca		
Ca	$\hat{Y} = 0,71 + 0,1995^{**}X + 0,0006^{**}X^2$; $\forall X$ entre 10,1 e 100,7 t ha ⁻¹	0,999
Mg	$\hat{Y} = 0,76 + 0,1997^{**}X + 0,0007^{**}X^2$; $\forall X$ entre 10,1 e 100,7 t ha ⁻¹	0,999
K	$\hat{Y} = 1,15 + 0,4318^{**}X + 0,0011^{**}X^2$; $\forall X$ entre 10,1 e 100,7 t ha ⁻¹	0,999

⁽¹⁾ Para $\forall X \leq 20$ e ≥ 200 t ha⁻¹, substituem-se estas produtividades na regressão e obtêm-se as doses suplementares de Ca, Mg e K. Para cana soca e ressoca, procede-se como para cana planta.

⁰, * e ** Significativos a 10, 5 e 1 %, respectivamente.

Grande parte do retorno de nutrientes em cana poderá ser realizado utilizando-se resíduos da própria agroindústria, principalmente vinhaça e torta de filtro, complementando-se, quando necessário, com o uso de fertilizantes de baixa solubilidade, como por exemplo, os fosfatos naturais reativos. O importante é que o SBNR-C disponibiliza a informação e quantifica a dose que viabiliza o cultivo sustentável.

Quadro 38. Equações que relacionam a dose suplementar de P (kg ha⁻¹) em cana planta, soca e ressoca em função da produtividade esperada (X, t ha⁻¹) e do P-rem (Z, mg L⁻¹)

Equação	R ²
Cana planta ⁽¹⁾	
$\hat{Y} = 6,84 - 0,0830^{**}X + 0,0011^{**}X^2 - 0,2545^{**}Z + 0,0027^{**}Z^2 + 0,0037^{**}XZ$ $\forall X$ entre 20 e 200 t ha ⁻¹ e $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L ⁻¹	0,997
Cana soca	
$\hat{Y} = 2,96 + 0,0939^{**}X + 0,0007^{**}X^2 - 0,1961^{**}Z + 0,0028^{**}Z^2 + 0,0047^{**}XZ$	0,999

$\forall X$ entre 13,6 e 135,6 t ha⁻¹ $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L⁻¹

Ressoca

$$\hat{Y} = 1,97 + 0,1064^{**}X + 0,0006^{**}X^2 - 0,1372^{**}Z + 0,0021^{**}Z^2 + 0,0044^{**}XZ \quad 0,999$$

$\forall X$ entre 10,1 e 100,7 t ha⁻¹ $\forall Z$ entre 8 e 48 mg L⁻¹

⁽¹⁾ Para $\forall X$ e $\forall Z$ fora do intervalo indicado nas equações, substituem-se as produtividades e os valores de P-rem limites nas regressões e obtêm-se as doses suplementares de P. Este mesmo procedimento deve ser adotado nas regressões de cana soca e ressocas;

** Significativo a 1%.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

As recomendações de adubação praticadas no País baseiam-se, essencialmente, em curvas de resposta, em que nutrientes são aplicados em doses crescentes e seus efeitos observados no incremento da produção, sendo tais calibrações regionalizadas e para determinados tipos de solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi de estruturar e desenvolver um Sistema para cálculo do Balanço Nutricional e Recomendação de corretivos e fertilizantes para Cana-de-açúcar (SBNR-C), tendo como base a demanda de nutrientes para uma determinada produtividade.

Para conhecer a demanda, estimou-se, por meio de regressões lineares, os Coeficientes de Utilização Biológico (CUB) dos nutrientes em função da produtividade. Especificamente, no caso do P, S e Zn, ajustou-se uma regressão múltipla, considerando como variáveis independentes a produtividade e o P remanescente, estimador da capacidade tampão do solo.

Para estimar o suprimento de nutrientes do solo, desenvolveram-se modelos com dados experimentais disponíveis na literatura, relacionando o teor recuperado por definido extrator em função da dose aplicada. Com isso, realizou-se o cálculo do balanço nutricional e a recomendação, quando necessária, de corretivos e fertilizantes. O modelo proposto para recomendar calcário em cana, comparado com os métodos usuais utilizados, mostrou-se consistente por recomendar calcário de forma

continua para qualquer produtividade, permitindo que a recomendação apresente um inter-relacionamento mais amplo com o sistema solo-planta e torne-se mais universalizado, além de estimar o pH final obtido para qualquer que seja a recomendação, o que possibilitará tomada de decisão quanto ao critério a utilizar em uma determinada situação.

A estimativa dos níveis críticos e as doses recomendáveis de K em ressecas mostraram-se coerentes com as doses recomendadas em cana planta e soca, diferenciando-se, principalmente, deste último cultivo, o que não prevê nenhuma tabela de recomendação de fertilizantes para cana-de-açúcar no País. Pela importância da contribuição das ressecas para produção de cana, é possível que haja uma lacuna da pesquisa para este tipo de cultivo.

Em cana planta, a recomendação do SBNR-C para P é menor quando comparada com as doses recomendadas pelas tabelas usuais de recomendação dos estados. Em solos intensivamente cultivados com cana-de-açúcar há, anualmente, grandes aplicações de fertilizantes fosfatados, o que, teoricamente, reduz o poder tampão. Dessa forma, recomendações um pouco menores provavelmente se aproximem com mais exatidão da previsão de doses de P a recomendar.

Os níveis críticos estimados de P em ressecas são menores do que em soca, não sendo prudente manter as mesmas recomendações de P em qualquer rebrota, como fazem as tabelas de recomendação dos estados.

A estimativa do efeito residual de P em soca e resseca mostrou-se consistente, podendo-se inferir que quanto menor o tempo de cultivo da cana planta, por exemplo, com o uso de variedades mais precoces, maior será o efeito residual de P em socas.

O ajuste de um modelo preditivo para quantificar o N potencialmente mineralizável em cana planta, soca e resseca, utilizando o teor de matéria orgânica e argila do solo, permitiu estimar o suprimento deste nutriente e, de forma consistente, recomendar N.

A simulação da recomendação para Zn, B e Cu mostraram níveis críticos compatíveis com resultados experimentais encontrados na literatura. As poucas informações existentes para Fe e Mn não permitiram sua completa modelagem. Versões futuras do SBNR-C poderão dispor destas informações.

Buscando viabilizar o cultivo sustentável da cana-de-açúcar, sugere-se, por meio de modelos de exportação de nutrientes em colmos, que as doses recomendáveis para atender demandas nutricionais de produtividades estabelecidas sejam acrescidas de doses suplementares que proporcionem sustentabilidade ao cultivo, de modo a não permitir a gradual exaustão do solo.

Idéias, números e estimativas propiciaram o desenvolvimento do Sistema. É evidente que, em sua grande maioria, estes números foram resultados de pesquisas realizadas com cana-de-açúcar no Brasil. Porém, uma parte deles e suas estimativas foram oriundos dos conhecimentos práticos vigentes. Mais do que uma hipótese de trabalho, o SBNR-C representa um projeto a ser confirmado e retroalimentado com novas pesquisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, G.A.C.; MARINHO, M.L. & ARAÚJO, J.T. Competição entre fontes de fósforo em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, Maceió, 1979. Anais. Maceió, v.2, 1979.

ALBUQUERQUE, G.A.C.; MARINHO, M.L. & ARAÚJO, J.T. Competição entre fontes de fósforo e efeitos residuais em soqueiras. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, Rio de Janeiro, 1981. Anais. Rio de Janeiro, 1981. v.3. p.174-189.

ALBUQUERQUE, G.A.C. & MARINHO, M.L. Efeito residual de fósforo em cana soca nos tabuleiros de Alagoas. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, São Paulo, 1984. Anais. São Paulo, 1984. p.153-159.

ALBUQUERQUE, G.A.C. & MARINHO, M.L. Resposta da cana-de-açúcar a combinações de DAP e Hiperfosfato. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, Maceió, 1979. Anais. Maceió, 1979. v.2. p.323-327.

ALCARDE, J.C. Característica dos corretivos da acidez do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE APLICAÇÃO DE CÁLCARIO NA AGRICULTURA, Piracicaba, 1986. Anais. Piracicaba, 1986. p.1-19.

- ALCOFORADO, P.A.U.G. Efetividade de diferentes materiais corretivos na correção da acidez de dois Latossolos e no crescimento do sorgo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 54p. (Tese de Mestrado)
- ALEXANDER, A.G. Sugarcane physiology, a comprehensive study of *Saccharum* source-to-sink system. Amsterdam, Elsevier, 1973. 752p.
- ALVAREZ, R.; OMETTO, J.C.; WUTKE, A.C.P.; ARRUDA, H.V. & FREIRE, E.S. Adubação da cana-de-açúcar – XI – Experiências com diversos fosfatos (1961 a 1963). *Bragantia*, 24:97-107, 1965.
- ALVAREZ, R.; WUTKE, A.C.P.; ARRUDA, H.V.; RAIJ, B.V.; GOMES, A.C. & ZINC, F. Adubação da cana-de-açúcar - Adubação NPK em Latossolo Roxo. *Bragantia*, 50:359-374, 1991.
- ALVAREZ V., V.H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V., V.H., FONTES L.E. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos e o desenvolvimento sustentável. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.615-646.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. *B. Inf. SBCS*, 25:27-32, 2000.
- ALVAREZ V., V.H. Efecto de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfato en la evaluación del fósforo disponible, de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Meseta Tarasca, Edo, Michoacán. Chapingo, Colégio de Postgraduados, 1982. 300p. (Tese de Doutorado)
- ALVAREZ V., V.H. & FONSECA, D.M. Determinação de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H. & RIBEIRO, A.C. Calagem. In: 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, 1999. p.43-60.
- ANDRADE, L.A.B. Efeitos das aplicações de fontes de boro, cobre e zinco em duas variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 1990. 155p. (Tese de Doutorado)

- ANDRADE, M.C. Modernização e pobreza: Expansão da agroindústria canavieira e seu impacto ecológico e social. São Paulo, Universidade Estadual Paulista, 1994. 250p.
- ARANHA, C. & YAHN, C.A. Botânica da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B., coord. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas, Fundação Cargill, 1987. v. I, 431p.
- AZEREDO, D.F. Alumínio no crescimento e na concentração de nutrientes em diferentes cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1982. 55p. (Tese de Mestrado)
- AZEREDO, D.F.; GLÓRIA, N.A. & MANHÃES, M.S. Efeitos da calagem na cana planta e nas características químicas de dois solos do Estado do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, Rio de Janeiro, 1981. Anais., Rio de Janeiro, 1981. p.71-88.
- AZEREDO, D.F.; ROBAÍNA, A.A. & ZANOTTI, N.E. Adubação mineral em cana-de-açúcar no Estado do Espírito Santo. *Saccharum*, 30:39-43, 1984.
- BAHIA FILHO, A.F.C. Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 178p. (Tese de Doutorado)
- BARROW, N.J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J., eds. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p.333-359.
- BENEDINI, M.S. Novo conceito no uso de calcário em cana-de-açúcar, 1988. v.16, 19p. (Série agrônômica)
- BITTENCOURT, V.C.; FAGANELLO, B.F. & SALATA, J.G. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta). *STAB*, 5:25-29, 1986.
- BITTENCOURT, V.C.; ORLANDO FILHO, J. & ZAMBELLO JÚNIOR, E. Determinations of available P for sugarcane in tropical soil by extraction with H₂SO₄ 0,5 N. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, São Paulo, 1978. Proceedings., São Paulo, 1978. v.2, p.1175-1186

- BORGES, A.L. Métodos de análise de solo para recomendação de calcário e obtenção do fator de calagem em casa de vegetação na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merril). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 58p. (Tese de Mestrado)
- BÜLOW, J.F.W. & DÖBEREINER, J. Potential for nitrogen fixation in maize genotypes in Brazil, Proc. Natl. Acad. Sci., 72:2389-2393, 1975.
- CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C. & VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 21:575-579, 1997.
- CAMARGO, P.B. Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes: úreia (^{15}N) e aquamônia (^{15}N) incorporados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1989. 104p. (Tese de Mestrado)
- CAMPELLO, M.R. Avaliação da reversibilidade de fósforo não-lábil para lábil em solos com diferentes características químicas, físicas e mineralógicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 63p. (Tese de Mestrado)
- CANTARUTTI, R.B. Dinâmica de nitrogênio em pastagens de *Brachiaria humidicola* em monocultivo e consorciada com *Desmodium ovalifolium* cv. Itabela no sul da Bahia. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 83p. (Tese de Doutorado)
- CARNAÚBA, B.A.A. Eficiência de utilização e efeito residual da úreia – ^{15}N em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp), em condições de campo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1989. 193p. (Tese de Mestrado)
- CARVALHO, L.C.C. Açúcar e álcool: mais oportunidades que ameaças. Agroanalysis, 17:36-38, 1997.
- CARVALHO, L.C.C. & GRAÇA, L.R. Produtividade agrícola da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1976. 34p.
- CATE, J.R.B. Sugestões para adubação com base na análise de solo: primeira aproximação. International Soil Testing Project, North Carolina State University, Recife, 1965. 16p.

- CAVALCANTI, F.J.; FERNANDES, C.S.; GOMES, R.F. & MOURA, R.J. Lucro com adubação NPK na cana-de-açúcar em Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 3:115-120, 1979a.
- CAVALCANTI, F.J.; FERNANDES, C.S.; GOMES, R.F. & MOURA, R.J. Lucro com adubação NPK na cana-de-açúcar em Pernambuco – primeira soca. Pesquisa Agropecuária Pernambucana, 3:30-50, 1979b.
- CHAVES SOLERA, M.A. Efeitos de relações Ca:Mg, utilizando carbonatos e sulfatos sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 186p. (Tese de Mestrado)
- CLEMENTS, H.F. Sugarcane crop logging and crop control: principles and practices. Honolulu, University of Hawaii, 1980. 520p.
- COPERSUCAR. Recomendações de fertilizantes em cana-de-açúcar. 1977. p.7-13. (Boletim Técnico Copersucar, 4),
- CORDEIRO, D.A. Efeitos da calagem e da adubação potássica sobre a produção de colmo e o equilíbrio nutricional da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1978. 92p. (Tese de Mestrado)
- COUTO, C., NOVAIS, R.F., TEIXEIRA, J.L., BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Níveis críticos de zinco no solo e na planta para o crescimento de milho em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade. R. Bras. Ci. Solo, 16:79-87, 1992.
- COX, F.R.; KAMPRATH, E.J. & McCOLLUM, R.E. A descriptive model of soil test nutrient levels following fertilization. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:529-532, 1981.
- DELAZARI, P.C. Disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Espírito Santo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 85p. (Tese de Mestrado)
- DIAS, L.E. Dinâmica de formas de enxofre e de cátions trocáveis em colunas de solo tratadas com diferentes doses de fósforo e de gesso. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 147p. (Tese de Doutorado)
- DILLEWIJH, C.V. Botany of sugar cane. Walthaman, The Chronica Botanica, 1952. 371p.

- DÖBEREINER, J.; DAY, J.M. & DART, P.J. Nitrogen activity in the rhizosphere of sugar cane and some other tropical grasses. *Plant and Soil*, 37:191-196, 1972.
- DÖBEREINER, J. & DAY, J.M. Dinitrogen fixation in the rhizosphere of tropical grasses. In: STEWART, E.W. ed. *Conference nitrogen fixation and the biosphere*. v.1. Edinburgh, Cambridge University Press, 1975. p.39-59.
- DÖBEREINER, J. Influência da cana-de-açúcar na população de *Beijerinckia* do solo. *Revista Brasileira de Biologia*, 19:251-258, 1959.
- ESCOSTEGUY, P.A.V. & BISSANI, C.A. Estimativa de H + Al pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:175-179, 1999.
- ESPIRONELO, A.; OLIVEIRA, H.; LEPSCH, I.F. & NAGAI, V. Efeitos da adubação NPK em três profundidades, em soca de cana-de-açúcar. I. Produção de cana e de açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DE TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, Rio de Janeiro, 1981, Anais. Rio de Janeiro, 1981, v.3, p.89-110.
- FABRES, A S.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. & CORDEIRO, A.T. Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:51-57, 1987.
- FARIA, C.M.B.; MORGADO, L.B.; PEREIRA, J.R. & ARAGÃO, O.P. Influência de fontes e níveis de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 18:849-853, 1983.
- FERNANDEZ ROJAS, I.E.J. Efeito do capeamento da apatita-de-araxá com alumínio sobre a disponibilidade de fósforo e o crescimento do sorgo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1992. 44p. (Tese de Mestrado)
- FERREIRA, G.B. Interferências de matéria orgânica e ferro na dosagem de boro com azometina-h e comparação de extratores para boro disponível no solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 97p. (Tese de Mestrado)
- FIXEN, P.E. & GROVE, J.H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R.L. ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison, Soil Science Society of America, 1990. p.141-180.

- FONSECA, D.M. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 146p. (Tese de Mestrado)
- FONSECA, D.M.; ALVAREZ V., V.H.; NEVES, J.C.L.; GOMIDE, J.A.; NOVAIS, R.F. & BARROS, N.F. Níveis críticos de fósforo em amostras de solos para o estabelecimento de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* e *Hyparrhenia rufa*. R. Bras. Ci. Solo, 12:49-58, 1988.
- FREIRE, F.M. Disponibilidade de fósforo e de enxofre para a cultura do milho em três solos de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 114p. (Tese de Doutorado)
- FREITAS, J.A.D. Determinação da necessidade de calagem para o crescimento inicial do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 99p. (Tese de Doutorado)
- GALRÃO, E.Z. Métodos de aplicação de cobre e avaliação da disponibilidade para a soja num latossolo vermelho-Amarelo franco-argilo-arenoso fase cerrado. R. Bras. Ci. Solo, 23:265-272, 1999.
- GARCIA, J.A.P. Cálcio, magnésio e potássio no solo e em plantas de algodão, utilizando magnesita calcinada e cloreto de potássio, em três níveis de calagem. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 79p. (Tese de Mestrado)
- GLORIA, N.A. & ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. 1981. (Boletim Técnico PLANALSUCAR)
- GOMES, F.P. & LIMA, U.de A. A Cana-de-açúcar no Mundo. In: MALAVOLTA, E. coord. Cultura e Adubação da Cana-de-açúcar. São Paulo, Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. 368 p.
- GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. & RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado. R. Bras. Ci. Solo, 13:13-24, 1989.
- GONÇALVES, J.S. & VEIGA FILHO, A.A. Prognóstico agrícola 1998/99. Álcool e açúcar, p.141-150, 1998.
- GRACIOLLI, L.A. Bactérias fixadoras de nitrogênio em cana-de-açúcar (*Saccharum* sp) em folhas, caules e raízes. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1982. 49p. (Tese de Mestrado)

- GUIMARÃES, E.; DEGASPARI, I.; GURGEL, M.N.A. & ALONSO, O. Estudos da influência de dois tipos de calcário sobre a acidez do solo e produção de cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DA AGROINDÚSTRIA AÇUCAREIRA, Águas de Lindóia, 1975a. Anais. Águas de Lindóia, 1975a. p.279-288.
- GUIMARÃES, E.; SALATTA, J.C.; GURGEL, M.N.A.; SANCHES, A.C.; DEGASPARI, I. & ROSSETO, A. Adubação fosfatada em soqueira de cana-de-açúcar. In: IV SEMINÁRIO COPERSUCAR DA AGROINDÚSTRIA AÇUCAREIRA, Águas de Lindóia, 1975. Anais. Águas de Lindóia, 1975b. p.37-40.
- GUSS, A. Exigência de fósforo para estabelecimentos de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais em solos com diferentes características físicas e químicas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 74p. (Tese de Mestrado)
- HAAG, H.P. Estudos de nutrição mineral na cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) variedade CB-4176 cultivada em solução nutritiva. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1965. 141 p. (Tese de Livre Docência)
- HUMBERT, R.P. The nutrition of sugar cane. In: HUMBERT, R.P. ed. The growing of sugar cane. Amsterdam, Elsevier, 1968. p.133-212.
- IAA/PLANALSUCAR. Relatório anual da seção de solos e adubação: 1978, Rio Largo, Coordenadoria Regional Nordeste, 1980.
- IAA/SONDOTÉCNICA. Projeto de irrigação e drenagem da cana-de-açúcar na Região Norte Fluminense; estudos de levantamentos pedológicos. Rio de Janeiro, IAA, v. 1, t. 3, 1983. p.406-622.
- INFORZATO, R. & ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar variedade Co. 290, em solo tipo Terra Roxa legítima. Bragantia, 16:1-13, 1957.
- IRVINE, J.E. Sugarcane. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENT, Los Baños, 1983. IRRI, Los Baños, 1983. p. 361-381.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; BURGOS, N.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, EMBRAPA, Centro de Pesquisas Pedológicas, v. I e II, SUDENE-DRN, 1973. 713p. (Boletim Técnico, 26)

- KINJO, T.; MARCOS, Z.Z. & JACOB, O.M. Produção de nitrato por incubação de amostras do horizonte Ap de solos da região canavieira de Piracicaba. R. Bras. Ci. Solo, 2:103-106, 1978.
- KORNDÖRFER, G.H. Fertilizantes fosfatados sólidos e fluidos na cana-de-açúcar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1990. 91p. (Tese de Doutorado)
- KORNDÖRFER, G.H.; PRIMAVESI, O. & DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA. 1989. v.47, p.32-36, (Boletim Técnico COPERSUCAR)
- LEMOS, E.E.P.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Comparação entre o N mineralizado através de incubações com e sem percolação e o N absorvido pelo milho em solo podzólico vermelho-amarelo. R. Bras. Ci. Solo, 12:127-130, 1988.
- LIMA FILHO, S. A.; ZAMBELLO JÚNIOR, E. & ORLANDO FILHO, J. Doses e fontes de fosfatos em cana planta no Estado de São Paulo. Saccharum, 5:37-43, 1982.
- LIMA JÚNIOR, M.A. Nitrogen nutrition of sugar cane in N.E. Brazil. Saskatoon, University of Saskatchewan, 1982. 172p. (Tese de Doutorado)
- LOPES, A.S. & CARVALHO, J.G. Micronutrientes: critérios de diagnose para solo e planta, correção de deficiências e excessos. In: BORKERT, C.M. & LANTMANN, A.F. eds. Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira. Londrina, EMBRAPA/IAPAR/SBCS, 1988. p.133-178.
- LOUZADA, P.T.C. Eficiência de uma escória de siderurgia como corretivo e fertilizante do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1987. 52p. (Tese de Mestrado)
- MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B., coord. Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas, Fundação Cargill, 1987. v. I, p.56-87.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; FAHL, J.I.; ARRUDA, H.V. & CIONE, J. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. Pesquisa. Agropecuária. Brasileira, 17:1321-1329, 1982.

- MALAVOLTA, E. & HAAG, H.P. Nutrição e adubação. In: MALAVOLTA, E.; SEGALLA, A.L.; PIMENTEL GOMES, F.; BRIEGER, F.O.; PARANHOS, S.B.; RANZANI, G.; VALSECHI, O.; JUNQUEIRA, A.A.B.; CAMARGO, A.P.; BERGAMIN, J.; TOFANNO, W.B.; PEIXOTO, A.M.; LIMA, U.A.; BENTO DANTAS; ORTOLANI, A.A.; HAAG, H.P.; CLOVIS, C.; LIMA, A. & OLIVEIRA, E.R. eds. Cultura e adubação da cana-de-açúcar. São Paulo, Instituto Brasileiro de Potassa, 1964. p.237-278.
- MANHÃES, M.S.; AZEREDO, D.F.; ROBAINA, A.A. & VIEIRA, J.R. Calibração do fósforo disponível para a cana-de-açúcar em solos do Estado do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (Zona da Mata). Brasil açucareiro, 97:50-56, 1981.
- MANHÃES, M.S. & GLÓRIA, N.A. Fósforo disponível para cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*) em solos do Estado do Rio de Janeiro. Brasil açucareiro, 96:21-30, 1980.
- MARINHO, M.L. & ALBUQUERQUE, G.A.C. Calagem. In: ORLANDO FILHO, J., coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1983. p.181-208.
- MARINHO, M.L. & ALBUQUERQUE, G.A.C. Efeitos do cobre e do zinco na produção de cana-de-açúcar em solos de tabuleiros em Alagoas. Brasil açucareiro, 98:41-50, 1981.
- MARINHO, M.L. Calagem para a cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO. Acidez e Calagem no Brasil, Campinas, 1983. p.245-258.
- MARINHO, M.L.; CAVALCANTI, G.A. & AMORIM, A.L.C. Influência do nitrogênio, fósforo e potássio no rendimento industrial dos canaviais de Alagoas. Brasil açucareiro, 86:19-29, 1975.
- MARINHO, M.L. Relações entre a percentagem de saturação de bases do solo e a produção de cana-de-açúcar em Alagoas. Sacharum, 7: 33-38, 1984.
- MARINHO, M.L. Respostas das culturas aos micronutrientes ferro, manganês e cobre. In: BORKERT, C.M. & LANTMANN, A.F. eds. Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira. Londrina, EMBRAPA/IAPAR/SBCS, 1988. p.239-264.
- MARTINS, M.A. Nível crítico de magnésio para soja em casa de vegetação. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1988. 65p. (Tese de Mestrado)

- MA/SUPLAN. Aptidão agrícola das terras. Brasília, BINAGRI, 1978/81. Coleção Estudos Básicos para Planejamento Agrícola, 1981.
- MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄. Nort Carolina Soil Test Division, 1953. (mimeografado)
- MELLO, J.W.V. Dinâmica de fósforo, ferro e manganês e disponibilidade de fósforo para arroz em solos inundados. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 212p. (Tese de Doutorado)
- MELLO, J.W.V.; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F. & ALVAREZ V., V.H. Concentrações críticas de fósforo em plantas de arroz cultivadas em solos inundados. R. Bras. Ci. Solo, 17:211-216, 1993.
- MENDONÇA, E.S. The Effects of the organic and mineral fractions on the acidity and charge of soils from the Cerrado Region, Brazil. USA, Reading University, 1992. 230p. (Tese de Doutorado)
- MEYER, J.H. The role of phosphorus in the production of sugarcane in South África. Phosphorus in Agriculture, 78:23-32, 1980.
- MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A. & BOHNEN, H. Recomendações de adubo e calcário para os solos do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1969. 38p. (Boletim Técnico, 2)
- MOHR, W.A. A influência da acidez sobre a fertilidade dos solos. In: CONGRESSO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, Campinas, 1960. Anais. Campinas, 1960.
- MORAIS, E.R.C. Formas de potássio em solos do Estado de Minas Gerais e sua disponibilidade para plantas de milho. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 85p. (Tese de Mestrado)
- MOURA FILHO, G. Disponibilidade de fósforo em amostras de solos de várzeas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. 76p. (Tese de Mestrado)
- MUNIZ, A.S. Disponibilidade de fósforo avaliada por extratores químicos e pelo crescimento de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 79p. (Tese de Mestrado)

- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 9:237-243, 1985.
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; FREIRE, F.M.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliadas por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. Revista Ceres, 34:125-151, 1987.
- NASCIMENTO, C.W.A. Acidez potencial estimada pelo pH SMP em solos do Estado de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 24:679-682, 2000.
- NEVES, J.C.L. Aspectos nutricionais em mudas de *Eucalyptus* spp. – tolerância ao alumínio e níveis críticos de fósforo no solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 87p. (Tese de Mestrado)
- NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. The influence of the soil phosphate capacity factor on soil and plant phosphorus critical levels of different vegetables. In: FRAGOSO, M.A.C. & BEUSICHEM, M.L.V. eds. Optimization of Plant Nutrition. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1993. p.73-76.
- NOVAIS, R.F. Phosphorus supplying capacity of previously heavily fertilized soils. Raleigh, North Carolina State University, 1977. 153p. (Thesis of Ph.D.)
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999. 399p.
- NOVELINO, J.O. Disponibilidade de fósforo ao longo do tempo em solos altamente intemperizados avaliada por extratores químicos e crescimento vegetal. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 70p. (Tese de Doutorado)
- OLIVEIRA, F.H.T. de. Disponibilidade de fósforo pela resina aniônica e difusão de alumínio em Latossolos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 45p. (Tese de Mestrado)
- OLIVEIRA, S.A. Avaliação da mineralização e disponibilidade de nitrogênio para trigo em solos do Distrito Federal. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1987. 128p. (Tese de Doutorado)

- ORLANDO FILHO, J. Absorção dos macronutrientes pela cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), variedade CB 41 – 76 em três grandes grupos de solos do Estado de São Paulo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1978. 154p. (Tese de Doutorado)
- ORLANDO FILHO., J. Influência varietal e do solo no estado nutricional da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) pela análise foliar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1976. 76p. (Tese de Mestrado)
- ORLANDO FILHO, J. & RODELLA, A.A. Análise química do solo e recomendação de adubação. In: ORLANDO FILHO, J. coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1983. p.155-178.
- ORLANDO FILHO, J. & ZAMBELLO JÚNIOR, E. Efeitos da adubação fosfatada em cana planta. *Saccharum*, 9:38-42, 1980.
- ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JÚNIOR, E. & SOUSA, J.A.G.C. Adubação nitrogenada em quatro variedades de cana planta em solo Latossol Vermelho-Escuro-orto. *Brasil açucareiro*, 4:6-14, 1977.
- PAES, J.M.V. Estudo de espaçamentos e fracionamento de doses de nitrogênio no comportamento de três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 98p. (Tese de Mestrado)
- PARENTONI, S.N.; FRANÇA, G.E. & BAHIA FILHO, A.F.C. Avaliação dos conceitos de quantidade e intensidade de mineralização de nitrogênio para trinta solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:225-229, 1988.
- PENATTI, C.P.; CHALITA, R.; PENNA, M.J. & MANECHINI, C. Fósforo na soqueira de cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA DA COPERSUCAR, São Paulo, 1986. Anais. São Paulo, 1986. p.275-281.
- PENATTI, C.P. Uso de ácido fosfórico ou superfosfato triplo como fonte de fósforo para a cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1991. 105p. (Tese de Mestrado)

- PEREIRA, J.R. & ARAGÃO, O.P. Efeito de diferentes fontes e níveis de nitrogênio na produção da cana-de-açúcar. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (CPATSA). Petrolina, Resumo de Atividades de Pesquisa, 1977. v.2, p.127-128.
- PEREIRA, M.G.; VALLADARES, G.S.; SOUZA, J.M.P.F.; PÉREZ, D.V. & DOS ANJOS, L.H.C. Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos do Estado do Rio de Janeiro. R. Bras. Ci. Solo, 22:159-162, 1998.
- PITTA, G.V.E. Correção da acidez do solo utilizando o método do Al^{+3} trocável e efeitos dela decorrentes em seis unidades de solos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1974. 152p. (Tese de Mestrado)
- PORTELA, M.C.L.S. Necessidade de calagem para as culturas do feijão e milho, em consórcio, em solos da microrregião Mata de Viçosa, Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 68p. (Tese de Mestrado)
- POTTKER, D. & TEDESCO, M.J. Efeito do tipo e tempo de incubação sobre a mineralização da matéria orgânica e nitrogênio total em solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 3:20-24, 1979.
- PREZOTTI, L.C. Nível crítico de potássio no solo para a produtividade de mudas de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1985. 45p. (Tese de Mestrado)
- QUAGGIO, J.A. Critérios para calagem em solos do Estado de São Paulo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1983a. 76p. (Tese de Mestrado)
- QUAGGIO, J.A. Métodos de laboratório para determinação de calagem em solos. In: RAIJ, B.V.; BATAGLIA, O.C. & SILVA, N.M. coords. Acidez e calagem no Brasil, Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983b. p.33-48.
- RAIJ, B.V.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RAIJ, B.V. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. R. Bras. Ci. Solo, 2:1-9, 1978.
- RAMOS, P. Situação atual, problemas e perspectivas da agroindústria canavieira de São Paulo. Informações econômicas, 29:9-24, 1999.

- Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco. CAVALCANTI, F.J.A. coord. Recife, 2ª aproximação, 2. ed. rev., IPA, 1998. 198p.
- Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. eds., Campinas, IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100)
- Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H. eds. Viçosa, 5ª aproximação, 1999. 359 p.
- RIBEIRO A.C. & TUKUNANGO SARABIA, W.A. Avaliação de extratores para zinco e boro disponíveis em Latossolo do Triângulo mineiro. R. Bras. Ci. Solo, 8:85-89, 1984.
- RINAUDO, G. Algae and bacterial non-symbiotic nitrogen fixation in paddy soils. Plant and soil, special vol, p.471-479, 1971.
- RIVAS YUPANQUI, F.F. Nutrição fosfatada e fotossíntese no sistema simbiótico *Medicago sativa* - *Rizobium meliloti* em solos com diferentes disponibilidades de fósforo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997.124p.(Tese de Doutorado)
- RIVERA PINEDA, P.A. Características químicas do solo e produtividade de soqueira de cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de corretivos e fertilizantes. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 72p. (Tese de Mestrado)
- RODELLA, A.A.& MARTINS, M. Efeitos de fonte e formas de aplicação de fósforo na produtividade da cana-de-açúcar, em cana planta. Álcool e açúcar, 8:26-32, 1988.
- RODELLA, A.A.; ZAMBELLO JÚNIOR, E. & ORLANDO FILHO, J. Calibração de cálcio, magnésio e acidez do solo para a cana-de-açúcar cultivada na região de cerrado, STAB, 2:45-48, 1984.
- RODRIGUES, E.C.O. Efeito da aplicação de sulfato de cálcio e de uma mistura de carbonatos de cálcio e magnésio sobre características químicas do solo e o crescimento de plantas de milho. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1993. 103p. (Tese de Mestrado)
- ROLIM, M.V. Fósforo disponível pelos extratores Mehlich-1, Resina em esfera e lâmina, em amostras de solos submetidos a diferentes graus de moagem. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 70p. (Tese de Mestrado)

- RUSCHEL, A.P.; ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO JÚNIOR, E. & HENIS, Y. Aerobic and anaerobic nitrogen-fixing bacteria in sugar cane roots. Proc. Int. Soc. Sugarcane Tech, 2:1903-1912, 1978.
- RUSCHEL, A.P. & VOSE, P.B. Nitrogen cycling in sugarcane. Plant and Soil, 67:139-146, 1982.
- SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. & ALVES, G.D. Mineralização do carbono e do nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 9:33-38, 1985.
- SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia (^{15}N) em aplicação única ou parcelada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 19:943-949, 1984a.
- SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. II. Deslocamento vertical e horizontal de $\text{NO}_3^- \text{-N}$ e $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 19:1103-1108, 1984b.
- SANTOS, M.A.C. & SOBRAL, A.F. Calibration of copper in sugarcane in Northeast Brazil. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, Manila, 1980. Proceedings. Manila, 1980, v.1, p.411-420.
- SCHMEHL, W.R. & HUMBERT, R.P. Nutrient deficiencies in sugar cane crops. In: SPRAGUE, B.H. ed. Hunger signs in crops; a symposium, New York, David McKay, 1964. p.145-150.
- SILVA, A.J.N.N. Caracterização de Latossolos Amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1996. 133p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, D.J. Necessidade de calagem e diferentes relações Ca:Mg para a produção de mudas de eucalipto. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 53p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, D.J. Transporte no solo, absorção, translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 80p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, F.C. Avaliação da disponibilidade de fósforo por diversos extratores em solos cultivados com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1991. 165p. (Tese de Mestrado)

- SILVA, J.T.A. Relações entre características do solo que refletem a capacidade-tampão de fósforo e o nível crítico para sorgo em dez Latossolos de Minas Gerais, em casa de vegetação. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. 85p. (Tese de Mestrado)
- SILVA, L.C.F. & CASAGRANDE, J.C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar (macronutrientes). In: ORLANDO FILHO, J. coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1983. p.78-99.
- SILVA, L.C.F.; MARAFON JÚNIOR, J.; BELTRAME, J.A.; ARAGÃO, J.A. & ORLANDO FILHO, J. Adubação fluida em cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. Brasil açucareiro, 106:27-32, 1988.
- SILVEIRA, J.A.G. Aspectos bioquímicos e fisiológicos da relação K/N em cana-de-açúcar (*Saccharum* sp) cv. NA-5679 cultivada em solução nutritiva. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1980. 127p. (Tese de Mestrado)
- SILVEIRA, J.A.G. Interações entre a assimilação de nitrogênio e o crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) cultivada em condições de campo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1985. 152p. (Tese de Doutorado)
- SOBRAL, A.P. & WEBER, H. Nutrição mineral de cana-de-açúcar (micronutrientes). In: ORLANDO FILHO, J. coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1983. p.101-122.
- SOUZA, D.M.G.; MIRANDA, L.M.; LOBATO, E. & CASTRO, L.H.R. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos cerrados. R. Bras. Ci. Solo, 13:193-198, 1989.
- STANFORD, G. & SMITH, S.J. Nitrogen availability mineralization potentials of soils. Soil. Sci. Soc. Am. Proc., 36:465-472, 1972.
- STANFORD, G. Sugarcane quality and nitrogen fertilization. The Hawaiian Planters' Record, 56:289-318, 1963.
- STRAUSS, E. Determinação do fósforo assimilável em solos de Pernambuco. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, Rio de Janeiro, 1954. Anais. Rio de Janeiro, 1954, v.1, p.515-518.

- SULTANUM, E. Considerações sobre a sintomatologia de micronutrientes em cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. *Brasil açucareiro*, 83:1-16, 1974.
- URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S. & BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: ^{15}N and nitrogen balance estimates. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 56:105-115, 1992.
- VIANA, A.R.; ANDRADE, L.A.B. & NETTO, A.J. Efeito da calagem e tolerância à acidez em 100 cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp): estudo preliminar. *Ciência prática*, 7:205-215, 1983.
- VIÉGAS, R.A. Dinâmica de fontes de fósforo aplicadas a solos com diferentes níveis de acidez. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 61p. (Tese de Mestrado)
- VIEIRA, I.M.S. Relações entre níveis de açúcares e atividades de invertases em tecidos de quatro cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) cultivadas a campo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1988. 129p. (Tese de Doutorado)
- VIEIRA, J.R. Reestruturação do Proálcool e continuidade da produção de álcool combustível no Brasil. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 134p. (Tese de Doutorado)
- VILLANI, E.M.A. Fluxo difusivo de fósforo influenciado por fontes e por tempo de contato do fósforo com o solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 57p. (Tese de Mestrado)
- VITTI, G.C.; MALAVOLTA, E. & FERREIRA, M.E. Respostas de culturas anuais e perenes à aplicação de enxofre. In: BORKERT, C.M. & LANTMANN, A.F. eds. Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira. Londrina, EMBRAPA/IAPAR/SBCS, 1988. p.61-85.
- VOSE, P.B. Stable isotopes as tracers: mainly the use of is ^{15}N -fixation. In: Introduction to Nuclear Techniques in Agronomy and Plant Biology, London, 1980, v.7, p.151-176.
- WUTKE, A.C.P.; ALVAREZ, R.; GARGANTINI, H. & ARRUDA, H.V. Restauração de solos para cultura de cana-de-açúcar – II Período 1956-1958. *Bragantia*, 19:675-687, 1960.
- WUTKE, A.C.P. & ALVAREZ, R. Restauração do solo para cultura de cana-de-açúcar. *Bragantia*, 27:201-217, 1968.

- YATES, R.A. The environment for sugarcane. Roma, FAO, 1977. 18p.
- ZAMBELLO JÚNIOR, E. Aluminum toxicity classification of soils in Brazil. Sugar Cane, 5:10-12, 1984.
- ZAMBELLO JÚNIOR, E. & AZEREDO, D.F. Adubação na Região Centro-Sul. In: ORLANDO FILHO, J. coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1983. p.289-313.
- ZAMBELLO JÚNIOR, E.; HAAG, H.P. & ORLANDO FILHO, J. Adubação NPK e localização do fertilizante em soqueiras de cana-de-açúcar. Variedade CB41-76. Brasil açucareiro, 97:36-46, 1981.
- ZAMBELLO JÚNIOR, E. & ORLANDO FILHO, J. A adubação da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil. 1981, v.3, p.1-26. (Boletim Técnico PLANALSUCAR)
- ZAMBELLO JÚNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J.; COLLETTI, J.T. & ROSSETO, A.J. Adubação de soqueiras em três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) cultivadas em terra roxa estruturada do Estado de São Paulo. Brasil açucareiro, 89:p.11-17, 1977.