BASES FISIOLÓGICAS DA ACUMULAÇÃO DE NITROGÊNIO
E POTÁSSIO EM CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp, cv. NA 56-79)
EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO NITROGENADA EM CAMBISSOLO

ROBERTO OSCAR PEREYRA ROSSIELLO

Engº Agrº, M.S.

Orientador: Prof. Dr. PAULO LIONEL LEBARDI

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Dezembro, 1987

BASES FISIOLÓGICAS DA ACUMULAÇÃO DE NITROGÊNIO
E POTÁSSIO EM CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp, cv. NA 56-79)
EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO NITROGENADA EM CAMBISSOLO

ROBERTO OSCAR PEREYRA ROSSIELLO

Aprovado em: 24/03/1988

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI	ESALQ/USP
Prof. Dr. JOAQUIM ALBENÍSIO GOMES SILVEIRA	ESALQ/USP
Prof. Dr. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI	ESALQ/USP
Prof. Dr. HENRIQUE PAULO HAAG	ESALQ/USP
Prof. Dr. MANLIO SILVESTRE FERNANDES	U.F.R.R.J.

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

A Eliane,
e aos meus amigos
do Centro de Integração
Humana de Campinas,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja agradecer a colaboração das seguintes pessoas e instituições:

- Ao Professor Dr. Paulo Leonel Libardi, pelo seu apoio profissional, e pela sua dedicação especial em todas as fases do presente trabalho;

- Ao Professor Dr. Mânlio Fernandes, pela sua condução no projeto de pesquisa no qual se enquadra o presente trabalho;

- Aos Professores Joaquim A. de Silveira (ESALQ/USP) e Deo L. Marzola (U.F.R.R.J.), com as quais o autor manteve uma valiosa troca de idéias sobre tópicos abordados no presente trabalho;

- A Sra. Marina F. Carvalho, nossa laboratorista chefe da Área de Nutrição de Plantas do Depto. de Solos da U.F.R.R.J., pela sua supervisão nas análises de rotina;

- À equipe técnica da Coordenadoria Regional Leste da PLANALSUCAR, em especial aos técnicos do Setor de Irrigação e Climatologia, pela sua assistência nas tarefas de irrigação associadas ao presente trabalho;

- Ao Engº Agrº Napoleão Muro (Usina São João, Campos, RJ) pelo seu apoio na condução das tarefas de campo;

- Aos colegas do Depto. de Solos da U.F.R.R.J., pelo seu apoio durante a fase de elaboração do presente trabalho;

Finalmente, um agradecimento não menos importante que qualquer outro, é dado aos trabalhadores rurais (na maioria eventuais) da Usina São João. Afinal, foram eles, que de enxada na mão, possibilitaram o presente trabalho.

A todos, o agradecimento do Autor.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	ix
SUMMARY	xi
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	07
2.1. Adubação nitrogenada e produção de cana: uma avaliação parcial de resultados	07
2.2. Possíveis razões da baixa resposta à aduba ção nitrogenada	12
2.2.1. Variabilidade experimental	13
2.2.2. Teores de C e N no solo	16
2.2.3. Fontes de N, época de aplicação e perdas por lixiviação e denitrifi- cação	21
2.2.4. Fixação biológica de nitrogênio ...	26
2.2.5. Diferenças varietais em utilização do nitrogênio	29
2.3. Interrelação entre N e crescimento	37
2.3.1. Absorção, assimilação e distribui- ção de formas de N em relação ao crescimento	37
2.3.2. Redistribuição do N absorvido	44
3. MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1. Aspectos gerais	47
3.1.1. Localização da área experimental ..	47
3.1.2. Caracterização do solo	48
3.1.2.1. Morfológica	48
3.1.2.2. Física	48
3.1.2.3. Química	53

Página

3.2. Procedimento experimental	55
3.2.1. Preparo do solo	55
3.2.2. Orientação e tamanho das parcelas .	55
3.2.3. Adubação basal	57
3.2.4. Plantio e tratos culturais	57
3.2.5. Tratamentos e delineamento experi- mental	58
3.2.6. Amostragem de plantas	59
3.2.7. Determinações analíticas	64
3.2.7.1. No material vegetal	64
3.2.7.2. No solo.....	64
3.2.8. Colheita final e análises tecnológi- cas	65
3.3. Definições e símbolos usados na análise de crescimento	67
3.4. Eficiência de interceptação da radiação so- lar	71
3.5. Análises estatísticas	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1. Condições ambientais durante o período de crescimento	74
4.2. Análise da produção da biomassa	80
4.2.1. Parte aérea	80
4.2.2. Raízes	84
4.2.3. Número e altura de colmos	88
4.2.4. Desenvolvimento do dossel vegetati- vo: área foliar total por colmo e índice de área foliar	92
4.2.5. Distribuição da biomassa total da parte aérea	95
4.3. Índice de área foliar e interceptação de radiação solar	101

4.4. Taxas de crescimento	105
4.4.1. Parte aérea (B _T)	105
4.4.2. Colmo (B _C)	108
4.5. Taxa de crescimento relativo	112
4.6. Taxa de assimilação líquida	117
4.7. Acumulação de nitrogênio na biomassa	119
4.7.1. Concentração de N	119
4.7.2. Acumulação de N por unidade de superfície	126
4.7.3. Taxa de acúmulo absoluto de N	129
4.7.4. Taxa de acúmulo relativo de N	131
4.8. Acumulação de potássio na biomassa	133
4.8.1. Concentração de K	134
4.8.2. Acúmulo de K por unidade de superfície	137
4.8.3. Taxa de acúmulo absoluto de K	140
4.8.4. Taxa de utilização específica	141
4.9. Produtividade final	144
4.10. Qualidade do caldo	149
5. CONCLUSÕES	152
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

ABREVIATURAS UTILIZADAS

AF	-	Área foliar
AFT	-	Área foliar por colmo
B _C	-	Biomassa de colmos
B _F	-	Biomassa de folhas
B _T	-	Biomassa total
DAP	-	Dias após plantio
EU _{N,K}	-	Eficiência de uso de nitrogênio ou potássio
IAF	-	Índice de área foliar
N	-	Número de colmos por unidade de superfície
P _C	-	Peso da matéria seca de colmo
P _F	-	Peso da matéria seca de folhas
P _T	-	Peso da matéria seca total (parte aérea)
RFA	-	Radiação fotossinteticamente ativa
RG	-	Radiação global
RL	-	Radiação líquida
TAL	-	Taxa de assimilação líquida
TAA _U	-	Taxa de acúmulo absoluto do nutriente
TAR _U	-	Taxa de acúmulo relativo do nutriente
TCA	-	Taxa de crescimento absoluta
TCC	-	Taxa de crescimento da cultura
TCH	-	Toneladas de cana por hectare
TCR	-	Taxa de crescimento relativo
TUE _{N,K}	-	Taxa de utilização específica de nitrogênio ou potássio
U	-	Conteúdo total do nutriente na biomassa.

BASES FISIOLÓGICAS DA ACUMULAÇÃO DE NITROGÊNIO
E POTÁSSIO EM CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum* spp, cv. NA 56-79)
EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO NITROGENADA EM CAMBISSOLO

Autor: Roberto Oscar Pereyra Rossiello
Orientador: Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

RESUMO

Foi realizado um experimento para estudar o efeito da adubação nitrogenada sobre os padrões sazonais de acumulação de biomassa seca em colmos e folhas de cana-de-açúcar (cv. NA 56-79), assim como os de nitrogênio e potássio.

O experimento foi conduzido em um solo típico da planície aluvial do rio Paraíba do Sul, em Campos, RJ. Três níveis de N (0, 120 e 240 kg N.ha⁻¹) constituíram os tratamentos principais, e foram dispostos no campo em blocos ao acaso, com oito repetições.

O acúmulo de matéria seca foi seguido através de onze amostragens mensais, entre os 90 e os 390 dias após plantio (DAP). Em cada data de amostragem foram medidos o peso fresco e seco de folhas e colmos, a altura da planta; o número de colmos por unidade de superfície de solo, a área foliar por colmo e os teores de N e K em cada porção da biomassa da parte aérea. Ao final do período experimental (390 dias) foi feita uma avaliação do peso do sistema radicular. Com base nos dados obtidos foram ajustadas funções de tipo logístico descritivas da variação da biomassa em função de

DAP. A partir dessas funções foram estimados os valores instantâneos da taxa de crescimento da cultura, taxa de crescimento relativo e taxa de assimilação líquida. De forma similar, foram estimados a taxa de acumulação absoluta, relativa e de utilização específica de N e K. Por ocasião da colheita foram medidos os rendimentos de cana, e feitas análises tecnológicas de qualidade do caldo (pol, brix, açúcares redutores e totais e conteúdo de fibra).

Os resultados obtidos indicaram que a aplicação de N, dentro da faixa de 120-240 kg.ha⁻¹ promoveu um aumento do crescimento vegetativo, traduzido em maior perfilhamento inicial e maior produção de biomassa na parte aérea. Houve maiores taxas de crescimento nesses tratamentos e maior expansão de área foliar.

A aplicação de N propiciou um mais rápido fechamento do dossel vegetativo e conseqüentemente maior interceptação de radiação solar. Houve um acúmulo de N e K na biomassa de colmos, proporcional ao nível de N aplicado. A aplicação de N afetou a eficiência de utilização de N e K no acúmulo de matéria seca. Maior o nível de aplicação, mais ineficientes as plantas se mostraram no seu uso. Não houve resposta produtiva além do nível de 120 kg N.ha⁻¹.

A aplicação de N não afetou significativamente a qualidade do caldo.

PHYSIOLOGICAL BASIS OF NITROGEN AND POTASSIUM
ACCUMULATION IN SUGARCANE (*Saccharum* spp, cv. NA 56-79)
IN RESPONSE TO NITROGEN FERTILIZATION IN CAMBIC SOIL

Author: Roberto Oscar Pereyra Rossiello
Adviser: Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi

SUMMARY

An experiment was worked out in order to study the effect of nitrogen fertilization on seasonal patterns of sugarcane (NA 56-79) dry biomass (stalks and leaves) nitrogen and potassium accumulation. The experiment was conducted in a typic aluvial soil of Paraiba do Sul river, Campos (RJ), Brazil. Three levels of nitrogen (0, 120 and 270 kg N.ha⁻¹) were the main treatments which were disposed in the field, with eighth replications, in a random blocks design. The dry matter accumulation was followed through eleven month sampling, during the period between 90 and 390 days after planting (DAP). In each sampling, the following were measured: fresh and dry weight of leaves and stalks, plant height, number of stalks per soil surface area, leaf area per stalk and N and K concentrations in each part of the aerial biomass. At the end of the experimental period (390 DAP) an evaluation of the root system weight was done. With the data obtained logistic functions were fitted describing biomass as a function of DAP. From these functions, instantaneous values of crop growth rate, net assimilation rate and relative growth

rate were estimated. In the same way, the absolute and relative accumulation rate and N and K specific utilization rate were also estimated. At the time of the harvest, sugar cane yields were measured and the following technological analyses of the juice quality were done: pol, brix, reducing and total sugar and fiber amount. The results have shown that the N application within the range 120-240 kg.ha⁻¹ increased the vegetative growth, that is, a bigger initial tillering and a bigger aerial biomass production; in these treatments there were higher growth rate and higher leaf area expansion. The nitrogen application also promoted a quicker canopy closing and hence a better solar interception. There was a N and K stalk biomass accumulation proportional to the N level applied. Besides, the N application affected the N and K utilization to the dry matter accumulation. The higher the N application level the less efficient the N and K plant use there was not positive response beyond the level 120 kg N.ha⁻¹. Finally the N application did not influence significantly the juice quality.

1. INTRODUÇÃO

O Norte Fluminense constitui, dentro do Estado do Rio de Janeiro, uma região agrícola diferenciada. Englobando quatorze municípios (15065 km²), no extremo N-NO do Estado, tem como polo natural a cidade de Campos.

Do ponto de vista agrícola, a região apresenta uma marcada especialização produtiva, sendo responsável por aproximadamente 92% do arroz e 86% da cana-de-açúcar produzida no Estado (INOJOSA, 1984). A cultura da cana ocupa a maior parte das terras da região. Elas compreendem basicamente três agrupações de solos: Latossolos, Podzólicos e associações dos mesmos (Área de "Tabuleiro"), Hidromórficos e Aluviais (Área de "Baixada") e Areias e Restingas que ocupam respectivamente 54,42 e 4% do total (ORLANDO F? e ZAMBELLO Jr., 1983a). A produtividade média da cana-de-açúcar nesses solos é muito baixa, variando de 20 a 50 tn.ha⁻¹, dependendo dos tipos de solo e condições climáticas (INOJOSA, 1984).

A partir de 1975, as expectativas geradas pelo Programa Nacional do Alcool tem dinamizado os empresários do setor. Programas para a expansão do parque industrial, tem

causado um aumento na capacidade global de processamento, nas principais usinas da região. Não somente tem sido expandida a capacidade industrial do parque pre-existente, como novas usinas autônomas foram instaladas. Por outro lado, a essa expansão do setor industrial, não tem correspondido um equivalente na área agrícola, determinando portanto, um aumento crescente na capacidade ociosa do setor industrial (INOJOSA, 1984).

Estima-se em $1,6 \times 10^7$ de sacos de açúcar de 50 kg o prejuízo sofrido pelos produtores de açúcar do Estado do Rio de Janeiro, entre 1974/83, como consequência das frustrações de safras, refletida pela diminuição do volume e do teor de sacarose das canas produzidas (INOJOSA, 1984). A resposta do setor foi a incorporação de novas áreas de plantio, estimando-se que houve uma expansão de 8×10^4 ha na última década. O processo de incorporação de novas áreas encontra uma limitante, determinada pelo custo de oportunidade das terras litorâneas, e no caso da expansão territorial, pelos aumentos nos custos de produção em função da distância (INOJOSA, 1984). Além disso, a expansão em áreas litorâneas encontra-se limitada pelas condições físico-químicas dos solos (elevado teor de areia, alta salinidade); enquanto que a expansão territorial implica na utilização crescente de áreas de relevo fortemente ondulado, que apresentam dificuldades para mecunização, adicionando-se riscos maiores de perdas por erosão do solo. Nesse dilema, a única alternativa para o setor é o aumento de produtividade da cultura. O reconhecimento dessa

situação levou à identificação dos principais fatores limitantes da produtividade: 1) deficiência hídrica, 2) adubação, 3) mecanização (INOJOSA, 1984).

Com relação à deficiência hídrica, os principais problemas radicam em uma insuficiência de precipitação associada a uma marcada variabilidade estacional entre anos. De forma geral, o índice anual oscila em torno de 1.000-1.200 mm, com 60-80% do total distribuído no período de outubro-março. Por outro lado, a demanda evaporativa situa-se em torno de 1.600 mm anuais, o que indica um déficit hídrico médio de 38%. Anos atípicos, com precipitações acima ou abaixo da média alternam-se com frequência, determinando quebras importantes de safra. O IAA/Planalsucar tem desenvolvido o programa PROJIR (Projeto de Irrigação e Drenagem da Cana-de-açúcar na Região Norte Fluminense), com o qual espera-se expandir a área de cana irrigada, que, em 1980 correspondia a apenas 0,5% da área plantada (COSTA, 1980).

Com base nessa problemática, foi elaborado o projeto de pesquisa "Estudo da nutrição em cana-de-açúcar sob condições de irrigação" (Depto. de Solos, U.F.R.R.J. / FINEP, 1982). Dentro desse projeto, inclui-se o presente trabalho. Ele supõe que, uma vez removida a limitação principal (deficiência hídrica), os rendimentos da cultura serão dependentes do nível de nutrição mineral disponível à cultura. Estudos de simulação, elaborados pela COPERFLU (Campos, RJ) indicam que se fossem otimizados os níveis dos tratamentos fitossanitários, de mecanização e adubação, o estabelecimento de um nível in-

intermediário de irrigação (fator 0,5), poderia elevar os rendimentos unitários de $22,5 \text{ tn.ha}^{-1}$ (nenhum trato cultural) para um nível de 130 tn.ha^{-1} (INOJOSA, 1984).

Considerando-se removida a deficiência hídrica, a problemática reside largamente na eficiência com a qual a cultura utiliza os nutrientes disponíveis, sejam eles oriundos do solo ou adicionados como fertilizantes. Os custos de adubação representam, na região centro-sul, um adicional de 20-25% sobre o custo total de produção da cana-planta (CARVALHO, 1983).

Existem, literalmente, dezenas de ensaios de adubação N-P-K em cana-planta no Estado do Rio de Janeiro, conduzidos pelos pesquisadores das entidades responsáveis pela promoção da cultura. Uma revisão nos dados disponíveis indica resultados contraditórios, produto da variação climática entre anos, e da variabilidade entre as unidades de solo estudadas.

As respostas oferecidas pela cultura à aplicação isolada de N, são particularmente controvertidas (ESPIRONELO *et alii*, 1977). O N é um nutriente de importância crucial no crescimento da cultura, seguido estritamente pelo K (SILVEIRA, 1985).

CHARLES-EDWARDS (1982) observou que na pesquisa agrônômica, em geral, os pesquisadores detêm-se no estágio de observação de resultados finais, mas raramente indagam a razão causal de uma dada resposta. Existe uma defasagem entre os pesquisadores de campo, interessados na obtenção de re

sultados regionais, com a finalidade de formular recomendações de adubação, e os envolvidos com a pesquisa em áreas básicas como bioquímica, fisiologia e nutrição de plantas. A integração entre esses dois níveis de pesquisa pode ser fornecida pelas técnicas de análise de crescimento (HARDWICK, 1984). Com o avanço conceitual nessa matéria (THORNLEY, 1976; NYE e TINKER, 1977; HUNT, 1978; WARREN WILSON, 1981; CHARLES-EDWARDS, 1982) ficou claro que a análise de crescimento pode ser aplicada tanto à análise de produção de matéria seca como de qualquer componente parcial da mesma, especialmente o conteúdo de nutrientes da biomassa vegetal (NYE e TINKER, 1977 ; HUNT, 1978).

Finalmente, qualquer produtividade obtida resultará sempre da interação entre o genótipo e o ambiente. Portanto, uma atenção especial deve ser dedicada às condições climáticas sob as quais o experimento se processa.

Em atenção as considerações prévias, este trabalho objetivou estudar o efeito da adubação nitrogenada sobre os seguintes aspectos do crescimento da cana-planta:

- a) O ritmo de acumulação da matéria seca total e sua distribuição entre colmos e folhas;
- b) O ritmo de expansão da área foliar e sua relação com a interceptação de radiação solar;
- c) A variação das taxas de crescimento e de assimilação líquida da cultura;

- d) A marcha de acumulação de N e K na biomassa;
- e) As taxas de absorção e utilização específica desses nutrientes;
- f) A relação entre a produtividade final e o crescimento vegetativo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ADUBAÇÃO NITROGENADA E PRODUÇÃO DE CANA: UMA AVALIAÇÃO PARCIAL DE RESULTADOS

É uma prática comum no plantio de cana-de-açúcar fertilizar-se a cultura com pequenas doses de nitrogênio (N) (BITTENCOURT et alii, 1986). Isto decorre da constatação de que a cultura parece não responder à adubação nitrogenada no mesmo grau que outras gramíneas cultivadas. Existem, entretanto, opiniões diversas sobre a magnitude dessa baixa resposta (ORLANDO Fº et alii, 1977; FARIA et alii, 1983; ESPIRONELO et alii, 1980; AZEREDO et alii, 1986). Razões várias têm sido aduzidas, as quais serão revisadas no item seguinte. Na Figura 1 são apresentados os resultados obtidos em 105 experimentos, produto de 24 trabalhos (TEIXEIRA e COBRA NETO, 1979; ORLANDO Fº et alii, 1977 e 1980; FARIA et alii, 1983; MONTELLI, 1970; PEIXOTO, 1970 e 1972; AZEREDO et alii, 1980 e 1986; GONDIM et alii, 1980; GUEDES et alii, 1979; SOBRAL e LIRA, 1983; ALVAREZ e PACHECO, 1963; ALVAREZ et alii, 1960 e 1963; BITTENCOURT et alii, 1986; REIS e CABALA-ROSAND, 1986; MA-

NHÃES *et alii*, 1978; ESPIRONELO *et alii*, 1980; MARINHO *et alii*, 1975; ROSSIHELLO *et alii*, 1983; PENNA *et alii*, 1987; CAVALCANTI *et alii*, 1979; BRINHOLI *et alii*, 1980), representativos das regiões tradicionais de produção de cana no país. O único critério de seleção foi a fonte de N (uréia ou amônia), considerando-se apenas resultados obtidos com cana-planta (ciclo variável entre 12-18 meses). Esses resultados foram expressos sob a forma de rendimentos relativos (R.R.) (Figura 1). O uso de R.R., na forma de percentagem do máximo valor obtido com a aplicação de um dado nível do nutriente (CAPÓ e SAMUELS, 1953) permite reduzir a variabilidade de resultados obtidos sob condições diversas de clima, solo, variedades, práticas de manejo e desenho experimental, tal como mostra a Tabela 1.

Admitindo-se que uma redução em R.R. da ordem de 10% sobre o máximo valor permita a obtenção de um contraste significativo (o que de fato ocorre, com umas poucas exceções), foi possível agrupar as respostas em duas faixas (R.R. maior ou menor que 90%, (Figura 1). Considerando-se o total de respostas "positivas" ($RR < 90\%$), para cada nível de N aplicado, em relação ao total das amostras, foi obtida a Figura 2.

A distribuição de frequências de $RR < 90\%$ (entre $0-160 \text{ kg N.ha}^{-1}$) mostra-se deslocada para a esquerda, e de fato, distribuiu-se aproximadamente segundo um modelo tipo Poison (relação variância:média = 1,35). Até o nível de 160 kg.ha^{-1} de N aplicado, a distribuição estima a probabilidade de ocorrência de contrastes significativos positivos.

Figura 1. Distribuição de rendimentos relativos da produção de cana (toneladas.ha⁻¹) discriminados por níveis de aplicação de N, observados em 105 experimentos.

Tabela 1. Produções médias, absolutas e relativas de toneladas de cana por hectare (TCH) e seus coeficientes de variação (CV%), em função do nível de N (uréia e amônia) aplicado, obtidas em 105 experimentos (1).

Dose de N (kg.ha ⁻¹)	n(2)	Média		CV (%)	
		TCH	R.R. (%)	TCH	R.R. (%)
0	96	99,3	87,7	27,6	13,9
20	7	95,1	89,3	27,0	12,2
40	19	96,5	88,0	30,8	12,1
60	43	110,1	94,1	30,0	7,6
80	38	114,3	96,0	22,1	5,3
100	11	94,7	94,9	18,3	4,3
120	28	115,7	95,7	26,7	4,2
140(3)	17	118,4	97,4	21,4	5,0
160	21	124,1	98,8	22,3	2,3
180	18	122,2	96,8	24,1	5,9
200	6	111,7	95,2	37,7	7,0

(1) Autores citados no texto

(2) Número de observações

(3) Rendimentos extrapolados a partir de resultados obtidos com a aplicação de 135-150 kg N.ha⁻¹

Figura 2. Frequência relativa de resultados com R.R. > 90%, em função do N aplicado, em 105 experimentos analisados. A parte listrada da coluna corresponde às frequências com R.R. < 90%.

Observou - se que já ao nível de 0 kg N.ha^{-1} , a probabilidade de obter respostas positivas foi de apenas 45%, caindo para 10% ao nível de 80 kg.N.ha^{-1} . Após o nível de 160 kg.N.ha^{-1} ($R.R. > 90\% = 100$), a ocorrência de contrastes significativos negativos aumentou, isto é, ocorreram novamente resultados com $R.R. < 90\%$, devido ao efeito depressivo de doses elevadas de N sobre TCH. Poucos autores trabalharam além dessa faixa (Tabela 1), de tal forma que é difícil estabelecer se a curva estabiliza segundo um modelo tipo Mitscherlich ou segue o modelo de parábola quadrática obtido por vários autores (AZEREDO et alii, 1986; FARIA et alii, 1983; ESPIRONELO et alii, 1977 e 1980; MARINHO et alii, 1975; REIS e CABALA-ROSAND, 1986). O valor médio da frequência relativa para $R.R. < 90\%$ na Figura 2 foi de 22,3%. Esse valor está próximo de 19%, obtido por AZEREDO et alii (1986) e MARINHO et alii (1975), porém é menor que a avaliação de ESPIRONELO (1980), que observou 36 a 55% de respostas positivas em 11 ensaios de adubação nitrogenada, e das observações de MALAVOLTA et alii (1963) (31% de respostas positivas em 32 ensaios).

No Havai, um reexame de 54 experimentos de adubação nitrogenada (INGRAM e HILTON, 1983) mostrou que o melhor modelo de ajuste entre $R.R.$ de açúcar e doses de N foi um exponencial do tipo: $A-B \exp(-C)$, onde A, B e C são parâmetros de ajuste. Embora o modelo fosse aplicado entre 0 e 672 kg N.ha^{-1} , a curva estabilizou-se por volta de 112 kg N.ha^{-1} ($R.R. \approx 90\%$), mantendo-se após esse nível, praticamen-

te constante. Esse resultado é compatível com a previsão da Figura 2: ao nível de 100 kg N.ha^{-1} , a expectativa para o R.R. de cana (base TCH) é da ordem de 91%.

2.2. POSSÍVEIS RAZÕES DA BAIXA RESPOSTA À ADUBAÇÃO NITROGENADA

Os resultados agrupados na Figura 2 e Tabela 1 mostram que as respostas de cana-planta à adubação nitrogenada são relativamente modestas: entre 0 e 160 kg N.ha^{-1} , o aumento observado em TCH é da ordem de 25% em 105 experimentos revisados. Isto decorre, primariamente, de um complexo de fatores ligados à dinâmica do N no sistema solo-planta-atmosfera. Um fator nem sempre levado em conta é a própria variabilidade experimental.

2.2.1. Variabilidade experimental

Na Tabela 1 observa-se que entre os níveis de $0-180 \text{ kg N.ha}^{-1}$ aplicados no solo, os coeficientes de variação (C.V.) dos resultados experimentais agrupados por nível, oscilam entre 18 e 30%. HILTON e MACKENZIE (1979), após a avaliação de 105 experimentos conduzidos no Havai, concluíram que não foi possível medir as diferenças em produtividade em função do N aplicado, em experimentos isolados, pois essas foram usualmente menores que a variabilidade do próprio

experimento. A Tabela 2, que resume os C.V. obtidos em 104 experimentos (ESPIRONELO *et alii* (1976 e 1980), ORLANDO *et alii* (1980); SOBRAL e LIRA (1983); AZEREDO *et alii* (1980 e 1986); BRINHOLI *et alii*, 1981; ALVAREZ *et alii* (1960 e 1963); PENHA *et alii* (1987) e CAVALCANTI *et alii*, 1979) mostra que a variabilidade experimental deve oscilar numa faixa bastante pequena para se obter um resultado significativo.

Tabela 2. Coeficientes de variação correspondentes a 104 experimentos de adubação nitrogenada, em cana-planta, agrupados por níveis de significância estatística ⁽¹⁾.

C.V. (%)	S ⁽²⁾	N.S. ⁽³⁾	Total	S/NS	S/Total
0-10	26	36	62	0,72	0,42
10-20	7	33	40	0,21	0,18
> 20	0	2	2	0	0

(1) Autores citados no texto

(2) Resposta significativa ao nível de 5% de probabilidade

(3) Resposta não significativa.

Das três faixas consideradas, observa-se que apenas quando o C.V. é menor que 10%, há possibilidade de obtenção de um contraste positivo em 42% dos casos observados. Se o C.V. excede o nível de 10%, a probabilidade de resposta positiva se reduz em 57% (0,18 vs. 0,42). Então, devido à estreita faixa de resposta da cana à adubação nitrogenada, so-

mente são obtidas respostas positivas em condições homogêneas de solo e manejo experimental. Normalmente, C.V. relativamente altos estão associados a poucas repetições ou uso de talhões comerciais como parte do desenho experimental (BRINHO LI et alii, 1981; CAVALCANTI et alii, 1979).

LIMA et alii (1987) cultivaram cana em vasos durante um ciclo de 12 meses sob condições de campo. Esses autores usaram 10 repetições, mas apenas um colmo primário por vaso (Tabela 3). Ao final do período de crescimento, o C.V. para matéria seca total foi de 29%, e para N-total acumulado na biomassa próximo a 39%. Na cultura da soca subsequente, os resultados foram ainda mais variáveis: 57,5% para matéria seca e 64% para N total. Os autores recomendaram aumentar o número de plantas por pote para reduzir a variabilidade entre repetições.

PEIXOTO e RICCI Jr. (1984) estudaram o efeito do tamanho da amostra sobre a variabilidade das seguintes características: número de perfilhos, altura da planta, diâmetro do colmo, percentagem de sólidos solúveis e produção. Observaram que, com a exceção do diâmetro do colmo, onde a medição de 50 plantas foi suficiente para estabilizar a média, todas as outras características demandavam a medição de 100 plantas ou mais.

Outros autores, como LEGENDRE et alii (1969) observaram que a medição de 20 colmos era um tamanho de amostra apropriado para a avaliação da altura e peso médio do colmo. Esses dados ilustram a alta variabilidade associada aos padrões de crescimento da planta.

2.2.2. Teores de C e N no solo

Existem poucos trabalhos, dentro da literatura revisada, que indiquem o teor inicial de N no solo. Na Figura 3 estão indicados os teores iniciais de N no solo apresentados em 5 pesquisas, incluindo um total de 21 experimentos (TEIXEIRA e COBRA NETO, 1979; TOLEDO e NOVAIS, 1962; ALVAREZ e PACHECO, 1963). Existe uma relação linear significativa entre o teor inicial de N no solo e o rendimento relativo de parcelas testemunhas (0 kg N.ha^{-1}). A reta de regressão prediz que a probabilidade de se encontrar um contraste positivo entre a produção da testemunha e a de um dado nível de aplicação de N é reduzida para níveis de N total no solo acima de 0,15%.

Solos com elevado teor de N, tendem a produzir acima de 90% do rendimento máximo, e são capazes de suprir, através da mineralização do seu N nativo a demanda de nitrogênio da cana-de-açúcar.

A dinâmica do N no solo está estreitamente relacionada ao do carbono (C) (SALCEDO et alii, 1985; LEWIS, 1986). SALCEDO et alii (1985) desenvolveram um estudo sobre as taxas de mineralização de C e N em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo Latossólico de Pernambuco. Eles encontraram uma relação linear positiva e significativa entre as quantidades de C-CO_2 evoluído e de $\text{N}(\text{NO}_3 + \text{NH}_4)$ acumuladas em tubos de percolação durante 11 semanas. Obtiveram taxas de mineralização de C, variáveis entre $1,8 \mu\text{g C-CO}_2.\text{g}^{-1}.\text{solo.dia}^{-1}$ para

Figura 3. Rendimento relativo de parcelas cultivadas com cana-de-açúcar sem adição de N, em função do teor inicial de N no solo. Assume-se que com 90% de R.R. não exista resposta positiva à aplicação de N.

a camada superficial (0-0,2 m) e $0,66 \mu\text{g C-CO}_2.\text{g}^{-1}.\text{solo.dia}^{-1}$ para a camada sub-superficial (0,2-0,6 m). Com relação à mineralização do N, as taxas, às profundidades indicadas, foram de $0,20$ e $0,08 \mu\text{g N.g}^{-1}.\text{solo.dia}^{-1}$, respectivamente. A extrapolação desses dados sobre a base anual indicou um fornecimento potencial de N-mineral, da ordem de 219 e 179 kg N.ha^{-1} para as camadas 0-0,2 e 0,2-0,6 m, respectivamente. Então, com base na acumulação esperada nos primeiros 0,6 m do perfil desse solo, a mineralização anual do N nativo forneceria 398 kg N.ha^{-1} à cultura. Isso seria mais do que suficiente para explicar a acumulação de um total de 255 kg N.ha^{-1} na biomassa (parte aérea) da cultivar Co 997, cultivada durante 16 meses, sem adição de N, nesse solo (SAMPAIO et alii, 1984). Outro fato interessante do estudo citado é o de que a adição de 60 kg N.ha^{-1} em aplicação única ou parcelada não afetou as taxas de mineralização de C e N observadas no tratamento testemunha.

Na Figura 4 mostra-se a relação entre os rendimentos relativos de parcelas testemunha correspondentes a 61 experimentos (ALVARES et alii, 1960 e 1963; ALVAREZ e PACHECO, 1963; TEIXEIRA e COBRA NETO, 1979; TOLEDO e NOVAIS, 1962; MANHÃES et alii, 1978; ORLANDO Fº, 1977 e 1980; BRINHOLI et alii, 1980; PENNA et alii, 1987; AZEREDO et alii, 1986), em relação aos teores iniciais de C orgânico presentes nos solos desses experimentos.

A relação resulta significativa face ao alto número de observações, porém com um baixo coeficiente de determinação ($r^2 = 0,10$). Naturalmente isso expressa a grande varia-

Figura 4. Rendimento relativo de parcelas cultivadas com cana-de-açúcar, em função do teor inicial de carbono no solo.

bilidade na dinâmica da relação C/N entre as unidades de solo onde atualmente cultiva-se cana-de-açúcar no país, além de um complexo de outros fatores, climáticos, edáficos e genotípicos. O menor valor de C orgânico encontrado, 0,34% (ou 0,59% de matéria orgânica) corresponde a um Vertissolo da Bahia, pH 8,0, CTC de 41,2 meq.100g⁻¹ solo. Nesse solo houve uma das maiores respostas observadas: o R.R. do nível 0 kg N.ha⁻¹ foi de 49,3 e 46,6% para uréia e sulfato de amônia, respectivamente. Houve resposta crescente até 200 kg N.ha⁻¹ e o teor de N foliar aumentou linearmente nessa faixa de aplicação (FARIA et alii, 1983). O maior teor de C orgânico encontrado na literatura revisada, 2,58% (ou 4,44% de matéria orgânica) ocorreu em um Latossolo Vermelho-Amarelo Orto, pH 4,8, em Tapiratiba, SP. A produção relativa de cana ao nível 0 kg N.ha⁻¹ foi de 94,5%, não existindo resposta significativa à aplicação de até 160 kg N.ha⁻¹ (ALVAREZ et alii, 1963).

Em áreas mais homogêneas, a relação entre matéria orgânica e produção (TCH) resulta muito mais definida. RIBEIRO et alii (1984) encontraram um coeficiente de correlação de 0,79 entre essas variáveis, analisando resultados obtidos em sete unidades de solo na região da Mata Norte de Pernambuco.

A relação C/N inicial do solo é portanto um fator a ser considerado. Uma parcela da relativamente alta variabilidade em TCH correspondente ao nível de 0 kg N.ha⁻¹ (Figura 1 e Tabela 1) pode ser explicada através desse argumento.

2.2.3. Fontes de N, época de aplicação e perdas por lixiviação e denitrificação

Na Figura 1, os rendimentos relativos em TCH foram discriminados segundo a fonte de N: uréia (45% N) ou sulfato de amônio (20% N). Na faixa de aplicação de 0-200 kg N. ha⁻¹, foram computadas um total de 252 respostas com emprego de sulfato de amônio, das quais 55, ou 21,8% do total, mostraram níveis de R.R. menores que 90%. Na mesma faixa, houve 107 respostas observadas com a aplicação de uréia, das quais 34, ou 31,8% do total mostraram R.R. < 90%. Esse resultado sugere uma ligeira superioridade da fonte amídica com relação à fonte amoniacal, mas a magnitude é pequena para explicar diferenças em respostas. A uréia está sujeita a perdas por volatilização, visto que, durante a sua hidrólise no meio torna-se alcalino, forma-se o carbonato de amônio, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, que depois desdobra-se em NH_3 além de CO_2 e H_2O . LIBARDI e REICHARDT (1978) estudaram o destino da uréia aplicada a um Alfisol (Terra Roxa Estruturada, TRE) cultivado com feijão em Piracicaba, SP. Eles observaram perdas negligíveis por volatilização de NH_3 na faixa de 0-120 kg N-uréia.ha⁻¹. RODRIGUES e KIEHL (1986) estudaram a magnitude das perdas por volatilização de NH_3 em solos Podzólico Vermelho-Amarelo (PVA), textura areia franca, pH 7,1; e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVd), franco arenoso, pH 5,8. Seus principais resultados incluem os fatos de que as quantidades de NH_3 volatilizadas a partir da uréia aumentavam de forma proporcional à do

sagem de N-uréia aplicada e que as perdas foram máximas quando da aplicação superficial (0-20 cm) e diminuíram com a profundidade de aplicação. Eles observaram ainda que houve maiores perdas no solo LVd, explicáveis pela sua menor capacidade de troca catiônica (CTC) na camada superficial em comparação com o solo PVA. Então, a menos que se trate de solos de textura superficial arenosa, pobres em matéria orgânica (e, conseqüentemente, de baixa CTC), as perdas por volatilização de uréia não são seguramente responsáveis pela ausência de resposta à adubação nitrogenada pela cana-de-açúcar, desde que o adubo seja incorporado apropriadamente.

Independente de qual a fonte de N aplicado ao solo, o íon NH_4^+ sofre rápida oxidação a NO_3^- , em condições não limitantes de aeração e temperatura (TAKAHASHI, 1969; CLEMENTS, 1980).

Em solos ácidos, porém, o baixo pH e o excesso de alumínio na solução podem limitar o processo de nitrificação (FERNANDES e ROSSIELLO, 1986).

O destino do NO_3^- gerado por via microbiológica inclui a sua imobilização (dependente da relação C/N do solo), a sua absorção radicular, sua migração no perfil fora do volume radicular (processo de lixiviação) e o seu retorno à atmosfera, na forma de óxidos gasosos de N ou como N elementar (processo de denitrificação). Dado o seu caráter aniônico e sua elevada solubilidade, o NO_3^- é facilmente lixiviado do perfil do solo. Mesmo em solos de caráter oxidico, os quais podem apresentar capacidade de troca aniônica (CTA, de-

pendente do pH), a retenção de NO_3^- é muito débil, já que seu processo de adsorção é inespecífico, sendo facilmente deslocado do complexo de troca por oxianions polivalentes, particularmente fosfatos e sulfatos (VELLOSO et alii, 1982). Evidentemente, se as propriedades físico-químicas do solo determinam um potencial de lixiviação de nutrientes, a sua magnitude real estará determinada pela quantidade de precipitação durante a estação de crescimento. Assim, KIEHL et alii (1981) encontraram, em cana-de-açúcar, uma correlação negativa entre os teores de $\text{N}(\text{NH}_4 + \text{NO}_3)$ presentes à profundidade de 0,3 m, em solos latossólicos e a quantidade de chuva no período outubro-dezembro (8-10 meses do ciclo da cultura). Isso após aplicação de 180 kg.ha^{-1} de sulfato de amônio aos 2 ou 8 meses pós - plantio. As magnitudes das perdas de N aplicado por lixiviação e seu possível significado em termos da não resposta da cana, é um fator a ser avaliado localmente (CLEMENTS, 1980).

Durante o ciclo da cultura de feijão, a quantidade de N perdida para o lençol freático, num solo TRE, teve o valor médio de $6,7 \text{ kg N.ha}^{-1}$, para aplicações iniciais de N-uréia de 0 a 120 kg.ha^{-1} (LIBARDI e REICHARDT, 1978), ou 15 kg N.ha^{-1} considerando-se a perda anual, à profundidade de 1,2 m, a partir de uma aplicação inicial de 100 kg.ha^{-1} de sulfato de amônio. Desse total, apenas 9% foram devidos ao N oriundo do fertilizante (MEIRELLES et alii, 1980).

SALCEDO e SAMPAIO (1984) estimaram perdas da ordem de 14 e 21 kg N.ha^{-1} , à profundidade de 1,0 m, após um ciclo de 16 meses de cultivo de cana em solo PVA, em respos-

ta à aplicação de 60 kg N-uréia, ha⁻¹. A menor perda foi associada à aplicação parcelada do fertilizante.

A estratégia para contornar possíveis perdas de adubo nitrogenado por lixiviação, baseia-se no controle da época de aplicação, através do parcelamento da dose total em pequenas quantidades ao longo do ciclo da cultura (CLEMENTS, 1980).

A maioria dos resultados resumidos na Figura 1 correspondem a trabalhos onde a aplicação do N foi parcelada. Como discutido anteriormente, muitos desses trabalhos mostram resultados não significativos, ou seja, o parcelamento na maioria dos casos é inefetivo. ESPIRONELLO *et alii* (1977 e 1980), observaram que, em 11 experimentos, conduzidos durante quatro anos consecutivos, o N aplicado totalmente aos dois meses foi tão eficiente quanto a aplicação parcelada e superior a uma aplicação única aos 8 meses. KIEHL *et alii* (1981) explicaram a falta de resposta a aplicação de N num solo PVA como decorrente da lixiviação do adubo, tanto quando aplicado no plantio como em cobertura, aos 8 meses.

AZEREDO *et alii* (1986) obtiveram duas respostas positivas num total de nove experimentos regionais. Num caso, um LVA com 13% de argila na camada arável não mostrou benefício quando a aplicação de N foi parcelada (4-8 meses pós-plantio). No outro caso, um Cambissolo Eutrófico (51% de argila), as respostas foram vigorosas, mas os parcelamentos foram sempre inferiores às aplicações únicas. Existem também comunicações de resultados positivos com o parcelamento da

aplicação do abudo (GUEDES *et alii*, 1979; ALBUQUERQUE e MARI-NHO, 1972) o que confirma que o manejo das perdas por lixiviação através do parcelamento é um fator de resposta local, li-gado principalmente à quantidade e distribuição estacional da precipitação.

Outro fator de perda de N do solo, que pode explicar a falta de resposta é o processo de denitrificação. AMRAL S? *et alii* (1983 e 1987) observaram que a adição de NO_3^- e doses crescentes de vinhaça resultaram numa perda de 18% do N adicionado, através da evolução de N_2O . Nesse experimento, foi usada a camada superficial de um solo PVA (textura fran-co-arenosa) representativo da região canavieira Norte-Fluminen-se. Então, é possível que, sob condições de campo, o mesmo efeito ocorra quando da adição da vinhaça complementada com N. CLEMENTS (1980) sugere, de fato, a aplicação de vinhaça para reduzir teores elevados de N-mineral no solo, os quais podem resultar depressivos para o rendimento final, particular-mente o teor de sacarose na cana. As condições que favorecem a desnitrificação do N no solo incluem alta relação C/N, abun-dante suprimento de NO_3^- , ambiente redutor, e temperatura em torno de 25-30°C (LEAL *et alii*, 1983; LEWIS, 1986).

A baixada deltaica de Campos (RJ) constitui-se numa grande planície aluvial, de relevo praticamente plano, e onde ocorrem entre outros, solos aluviais, Cambissolos, Pod-zois hidromórficos e Gleis húmicos (RAMOS e CUNHA, 1985). Es-ses solos apresentam drenagem imperfeita a moderada, lençol freático próximo da superfície e são de textura superficial

argilosa/média (RAMOS e CUNHA, 1985). A ocorrência de chuvas intensas e ou irrigações não controladas podem, além da remoção de NO_3 através da sua percolação no perfil, favorecer grandemente o processo de denitrificação nesses solos. Entretanto, AZEREDO et alii (1986) no experimento acima citado, encontraram uma resposta altamente significativa à adição de 160 kg N.ha^{-1} em Cambissolo eutrófico. A precipitação pluviométrica no seu período experimental (17 meses) totalizou 1478 mm, sendo que o normalmente esperado seriam 1370 mm. Esse resultado deixa em aberto a questão da magnitude das perdas de N nesses solos.

Em síntese, perdas de N aplicado podem ocorrer por lixiviação e/ou denitrificação, particularmente em solos de textura arenosa; ou em solos mal drenados, e por essa via, reduzir a eficiência de recuperação do adubo nitrogenado, explicando a falta de resposta em alguns casos. O parcelamento da aplicação geralmente resulta inefetiva em termos de aumento de absorção de N e conseqüentemente da produção final (SALCEDO e SAMPAIO, 1984; BITTENCOURT et alii, 1986). A aplicação de uréia em cobertura, sem a adequada incorporação, pode propiciar também perdas por volatilização.

2.2.4. Fixação biológica de nitrogênio

Com a demonstração de que a cana-de-açúcar pode fixar N_2 atmosférico, através da sua associação com uma variada população de microrganismos rizosféricos (DÖBEREINER,

1961; RUSCHEL, 1982; RUSCHEL e VOSE, 1982), vários pesquisadores têm atribuído a falta de resposta da cultura à adubação nitrogenada a esse fator. Com o refinamento das técnicas analíticas (RUSCHEL e VOSE, 1982), os estudos de diluição isotópica de ^{15}N têm mostrado que uma proporção variável (17-38%) do N total acumulado na biomassa da cana pode ser oriundo de fixação biológica (RUSCHEL e VOSE, 1982; RUSCHEL, 1984). FREITAS et alii (1984) estimaram que 37,7% do N total incorporado nas raízes da variedade CB 41-76, aos três meses de idade, foi proveniente dessa fonte. A variedade CB 47-89 parece mais promissora ainda: a comparação da magnitude da diluição isotópica do ^{15}N proveniente do fertilizante ou do solo, em relação ao N total acumulado na sua biomassa, ao final de 12 meses de cultivo, permitiu inferir que aproximadamente 45% do N acumulado poderia ser oriundo de fixação biológica (LIMA et alii, 1987). Outras três variedades incluídas na comparação, mostraram níveis muito mais baixos, incluindo NA 56-79, que mostrou ao final de 21 meses de crescimento, o mais baixo balanço de N no sistema solo-planta considerado (LIMA et alii, 1987).

Esses resultados preliminares apontam para uma futura exploração desse mecanismo de fixação associativa (RUSCHEL, 1984), sabendo-se ainda que fora a incorporação rizosférica, existe incorporação na filosfera e no colmo (RUSCHEL e VOSE, 1982).

Em leguminosas, a fixação simbiótica de N é grandemente reprimida pelo aumento do teor de N-solúvel no so

lo, o que significa dizer que a adubação nitrogenada inibe a atividade da nitrogenase, a enzima responsável pelo processo (LEWIS, 1986). Em milho (que, como outras gramíneas tropicais, mostra fixação associativa de N_2 , NEVES et alii, 1976), PEREIRA et alii (1978) mostraram que a aplicação de uma dose elevada de N (235 kg N.ha^{-1}) inibiu quase completamente a atividade da nitrogenase, que contudo, mostrou valores elevados de atividade à dose baixa de aplicação (35 kg N.ha^{-1}). Parece que a aplicação de níveis moderados de N-mineral não suprime a fixação biológica, permitindo uma contribuição variável e conjunta das três fontes (N do fertilizante, do solo e da atmosfera) à nutrição nitrogenada de gramíneas (NEVES et alii, 1976; PEREIRA et alii, 1978). Em cana-de-açúcar, níveis de $N-NH_4^+$ na solução da ordem de 3 ppm já são suficientes para inibir completamente a fixação associativa de N_2 (RUSCHEL e VOSE, 1982). Por outro lado, o N adicionado como fertilizante parece não afetar a atividade dos microrganismos fixadores (RUSCHEL, 1984), o que pode ser uma decorrência da rápida nitrificação da fonte amoniacal. Pode ser que a níveis baixos ou moderados de aplicação de N-mineral, a fixação biológica possa ter uma contribuição tal que determine um nivelamento na acumulação de N na biomassa, tendendo a igualar os rendimentos finais em relação a níveis superiores de aplicação de N. Esse mecanismo, por exemplo, poderia ser operativo numa variedade como a CB 41-76, desde que os altos níveis de incorporação de N_2 atmosférico estimados em vasos (LIMA et alii, 1987), possam ser confirmados em condições naturais de campo.

Se ou não a fixação biológica de N_2 é um processo tão significativo ao ponto de mascarar a capacidade de resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada de uma forma geral, é difícil de se estabelecer ao nível do conhecimento atualmente disponível. RUSCHEL (1984) destacou a insuficiência de dados como se queira a transferência do N_2 fixado à planta, assim como a carência de dados ecofisiológicos relativos à associação. Estimativas a longo prazo, só podem ser feitas com a metodologia de diluição isotópica (RUSCHEL e VOSE, 1982), a fim de se quantificar sobre uma base realística as taxas potenciais de incorporação do N_2 atmosférico à planta. Na carência dessas informações básicas, parece um tanto arriscado atribuir à fixação biológica qualquer falta de resposta à adubação nitrogenada.

2.2.5. Diferenças varietais em utilização do nitrogênio

As modernas variedades de cana-de-açúcar são híbridos tri-específicos de *S. officinarum*, *S. spontaneum* e *S. robustum* (GASCHO e SHIH, 1983; ALEXANDER, 1985). Isto implica na existência de variabilidade genotípica para a expressão de caracteres ligados a crescimento e produção (IRVINE, 1975; BULL e GLASZIOU, 1975; NICKEL, 1975). Uma vez absorvido, a assimilação do N processa-se rapidamente (SILVEIRA, 1981 e 1985). Entretanto, tem sido observado que os cultivares diferem nas suas taxas de assimilação em diferentes estágios de desenvolvimento fisiológico, e que essas diferenças são

responsáveis pela variação nos seus requerimentos nutricionais (MALAVOLTA e HAAG, 1964; HUMBERT, 1974; SILVA e CASAGRANDE, 1983; GASCHO et alii, 1986). Com relação à nutrição nitrogenada, existem variedades mais ou menos sensíveis à adubação, isto é, respondem em maior ou menor grau.

É interessante a observação de ZAMBELLO Jr. e AZEREDO (1983) de que a baixa resposta ao N observada em experimentos conduzidos em Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro, em relação à observada em São Paulo, deve-se em parte à maior utilização da variedade CB 45-3 nesses Estados. Essa variedade é considerada de baixo potencial de resposta ao N (AZEREDO et alii, 1981; ZAMBELLO Jr. e AZEREDO, 1983).

Uma forma de se avaliar o potencial de resposta de uma dada variedade é através do coeficiente de utilização do nutriente considerado. Este coeficiente pode ser definido como a quantidade de biomassa total produzida (ou da fração colheitável da mesma, o seu índice de colheita) por unidade de nutriente absorvido pela planta (GERLOFF, 1976). Nesse sentido, nada mais representa que o inverso da concentração do nutriente na fração da biomassa seca considerada (GERLOFF, 1976; CHAPIN e BIELESKI, 1982).

Quanto esse parâmetro é utilizado de forma comparativa é chamado "eficiência de uso". GASCHO et alii (1986) o denominaram eficiência de uso "interna" parao diferenciar da eficiência "externa" (kg de biomassa produzida, por unidade de N aplicado como fertilizante). É importante destacar que o conceito de eficiência de utilização, tal como definido aci-

ma, independe de qual a fonte de N que esteja suprindo primariamente a demanda radicular (N nativo do solo, do fertilizante ou da atmosfera).

Na Tabela 3 estão apresentados valores de eficiência de uso de N (EU_N) em sete grupos de variedades. Os cálculos da EU_N foram feitos a partir das informações apresentadas pelos autores indicados na tabela, com referência aos valores finais de colheita. A partir desses dados, EU_N foi calculada de duas formas: como kg.cana (peso fresco) por kg. de N acumulado na parte aérea (N-P.A.) ou no próprio colmo (N-colmo). As recíprocas desses valores, expressos como kg N-P.A. ou N-colmo por tonelada de cana estão também indicados. Esses índices são uma estimativa do requerimento interno para produção (STANFORD e AYRES, 1964). Para as variedades CP tabeladas, os autores (GASCHO et alii, 1986) não forneceram a quantidade total de N acumulada na biomassa e seus valores referem-se à primeira soca. Também está indicada na Tabela 3, a relação de partição entre o N acumulado no colmo e o N total da parte aérea (N-colmo + N-folha) ao final do ciclo de cultivo. Como será discutido posteriormente, essa relação muda temporalmente e é afetada por diferenças genotípicas.

O exame da Tabela 3 permite inferir que, de fato, existem diferenças genotípicas quanto à EU_N , ou seja que existem requerimentos varietais diversos para a produção de uma quantidade unitária de colmo industrial. Uma comparação interessante é a do desempenho da variedade CB 41-76 em relação à Co 419. Esta última variedade possui aparentemente o

Tabela 3. Eficiência de utilização do N, Requerimento interno para produção, e relação de repartição de N entre colmo e parte aérea, em sete grupos de variedades. Os índices são relativos aos valores finais de colheita

Variedade	Eficiência de utilização do N (kg cana.kg N ⁻¹)		Kg N acumulado por 10 ³ kg.colmo		kg N-colmo		Ref.
	N-colmo(2)		N-colmo		Observações		
	N.P.A.(1)	N-P.A.	N-P.A.	kg N-P.A.			
SP 70-3145	529,2	814,8	1,90	1,23	0,65	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
SP 70-3303	800,0	1285,7	1,25	0,78	0,62	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
SP 70-3449	507,9	848,7	1,87	1,18	0,60	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
NA 56-79	722,8	1023,9	1,38	0,98	0,71	0 kg N.ha ⁻¹	(b)
NA 56-79	614,7	791,3	1,63	1,26	0,78	450 kg N.ha ⁻¹	(b)
NA 56-79	718,8	1000,0	1,39	1,00	0,72	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
NA 56-79	595,9	1380,5	1,68	0,72	0,43	(3)	(c)
CB 41-76	619,0	1087,0	1,62	0,92	0,57	90 kh.N ⁻¹ . Valores médios de 3 solos	(d)
CB 41-76	397,5	819,0	2,52	1,22	0,48	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
CB 47-355	422,0	1046,4	2,37	0,96	0,41	(3)	(c)
CB 47-59	348,3	865,3	2,87	1,16	0,40	(3)	(c)
CP 63-588	385,0	-	2,60	-	-	Cana soca. Valores médios para 0-896 kg N.ha ⁻¹	(e)
CP 65-357	556,0	-	1,79	-	-	Idem	(e)
CP 68-1026	769,0	-	1,30	-	-	Idem	(e)
H 50-7209	477,6	905,7	2,09	1,10	0,53	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
H 59-3775	650,6	964,2	1,54	1,04	0,68	60 kg N.ha ⁻¹	(a)
Co 419	476,5	756,8	2,10	1,32	0,63	40 kg N.ha ⁻¹	(f)
Co 997	509,8	1151,3	1,96	0,87	0,44	60 kg N.ha ⁻¹	(g)
IAC 52-150	465,9	1139,9	2,14	0,88	0,41	(3)	(c)

(1) Calculado com base no N total (kg.ha⁻¹) acumulado em folhas + colmos.

(2) Calculado com base no N total (kg.ha⁻¹) acumulado no colmo

(3) Experimento em pote (64 kg.solo), em condições de campo. 80 kg.N.ha⁻¹. Dados originais recalculados, assumindo-se 1 kg.cana (peso fresco) = 0,3 kg.cana (peso seco (STANFORD e AYRES, 1964)).

Referências: (a) BUTENCOURT et alii, 1986; (b) SILVEIRA, 1985; (c) LIMA et alii, 1987; (d) ORLANDO P et alii, 1980 (e) GRASCHO et alii, 1986; (f) CATANI et alii, 1959; (g) SAMPÃO et alii, 1984).

mais alto requerimento interno entre as referidas na Tabela 3 ($1,32 \text{ kg N-colmo.Tn}^{-1} \text{ colmo}$) (CATANI et alii, 1959). ALVAREZ e PACHECO (1963) obtiveram uma produtividade de 133,7 TCH com essa variedade mediante a aplicação de 180 kg N.ha^{-1} .

Por outro lado, MALAVOLTA et alii (1963) apresentaram resultados com a CB 41-76, indicando que uma produção similar (131,7 TCH) foi obtida com a aplicação de 120 kg N.ha^{-1} . Então, as eficiências aparentes de produção para Co 419 e CB 41-76 foram nesses experimentos de 742,8 e 1097,5 $\text{kg.colmo.kg}^{-1} \text{ N}$ aplicado respectivamente. O fato de que esses valores sejam muito próximos dos valores de EU_N (base $\text{kg.cana.kg}^{-1} \text{ N-colmo}$) mostrados na Tabela 3 podem ser fortuítos, uma vez que as condições experimentais e as taxas de N aplicadas foram diferentes. Alternativamente, abrem a sugestão de que em cana-de-açúcar, como em outras plantas cultivadas existe um certo controle genotípico sobre as taxas de absorção de nutrientes (CLARK, 1983; GERLOFF, 1976; GASCHO et alii, 1986).

De interesse também na Tabela 3 é que a média intervarietal para o requerimento interno de N é de aproximadamente $1,04 \text{ kg N-colmo.Tn}^{-1} \text{ colmo}$ ou $1,95 \text{ kg N-P.A..Tn}^{-1} \text{ colmo}$. Então, para a produtividade de 100 TCH, que poderia ser obtida com aplicações de $0-100 \text{ kg N.ha}^{-1}$ (Tabela 1), a cultura poderá exportar um total de 195 kg N.ha^{-1} , com um índice de recuperação de 57% nos colmos. Esta avaliação é próxima de avaliações experimentais específicas (STANFORD e AYRES, 1964; HUMBERT, 1974; ORLANDO Fº, 1980; VALDIVIA, 1982; SAMPAIO et alii, 1984).

Outro aspecto de interesse é a constatação de como a EU_N varia em função do N aplicado. GASCHO et alii (1986) mostraram que a eficiência interna de uso de N por quatro cultivares (variedades CP) somente foi deprimida significativamente a uma taxa de aplicação externa de 896 kg N.ha^{-1} , tendo a EU_N sido expressa em termos de kg.cana ou kg.açúcar. Na Tabela 3 observa-se que a variedade NA 56-79 mostra um valor de EU_N em torno de $720 \text{ kg.cana.kg}^{-1} \text{ N-PA}$ para níveis de 0-60 kg N.ha^{-1} aplicados (comparar referências (a) e (b)). Porém, quando cultivada com 450 kg N.ha^{-1} (SILVEIRA, 1985) a sua EU_N foi reduzida em 15% ($614,7 \text{ vs. } 720 \text{ kg cana.kg}^{-1} \text{ N-PA}$). Esses resultados indicam que ao menos dentro das faixas de recomendação de adubação nitrogenada na região Centro-Sul do país (ZAMBELLO Jr. e ORLANDO Fº, 1981; ZAMBELLO Jr. e AZEREDO, 1983) provavelmente a EU_N de uma dada variedade não resultará grandemente afetada pelo aumento da dosagem de N aplicado à cana-planta. Uma análise posterior da Tabela 3 revelou a existência de uma correlação positiva ($r = 0,681^{**}$) entre EU_N ($\text{kg cana.kg}^{-1} \text{ N-PA}$) e a relação de repartição N-colmo/N-PA (Figura 5).

CHAPIN e BIELESKI (1982) demonstraram que sob condições de crescimento comparáveis, as espécies ou cultivares ineficientes mostraram taxas de crescimento menores, e maiores concentrações de nutrientes na sua biomassa, em relação a cultivares eficientes. Então, cultivares ineficientes no uso do N, são eficientes acumuladores de N na sua biomassa, e mostrarão maior resposta a aplicação da adubação ni-

Figura 5. A relação entre EU_N e a relação N-colmo/N-P.A. observada em 15 variedades de cana-de-açúcar.

trogenada em relação a cultivares eficientes. GALLO *et alii* (1968) num levantamento do estado nutricional de canaviais do Estado de São Paulo (32 locais), observaram que tanto aos 4 quanto aos 9 meses de idade, as folhas +3 da variedade Co 419 mostraram concentrações de N significativamente maiores que as de CB 41-76.

A maioria do N alocado nas folhas encontra-se sob forma de N-protéico (SILVEIRA, 1985). Isto pode significar, numa variedade ineficiente, um maior consumo respiratório de carboidratos na forma de respiração de manutenção. As perdas respiratórias totais são proporcionais ao conteúdo de N-protéico na biomassa (BARNES e HOLE, 1978; GREENWOOD *et alii*, 1978). Assim, uma variedade acumuladora de N foliar, gastará uma fração maior da sua fotossíntese bruta na manutenção ("turnover") de suas proteínas estruturais e aquelas ligadas à assimilação do N absorvido, especialmente a redução do nitrato, uma enzima de vida média curta (MENGEL e KIRBY, 1982), em relação a outra variedade com menor capacidade de acumulação de N-protéico.

Por outro lado, as variedades acumuladoras de N-protéico terão maiores taxas de expansão foliar por unidade de peso seco (MENGEL e KIRBY, 1982), isto é, mostrarão uma maior Área Foliar Específica (A.F.E.) e, conseqüentemente, suas lâminas foliares serão de menor espessura. Em cana, IRVINE (1967, 1975) mostrou que a taxa fotossintética está relacionada de forma inversa com a A.F.E., através do exame de cultivares com uma ampla faixa de origem genética. Essa observação

não é peculiar à cultura e tem sido demonstrada em várias outras espécies (IRVINE, 1975; THORNLEY, 1976; CHARLES - EDWARDS, 1982). Variedades com baixa eficiência de uso de N poderão mostrar baixas taxas de fotossíntese por unidade de área foliar, sendo que o aumento correlato da quantidade de área foliar por unidade de área cultivada (ou Índice de Área Foliar, IAF) poderá compensar essa desvantagem (IRVINE, 1975). Então, a interrelação dessas variáveis (respiração de manutenção, taxa fotossintética e IAF) pode explicar parcialmente diferenças em EU_N .

SILVEIRA (1985) mostrou uma correlação positiva entre o IAF e a quantidade de N acumulada na biomassa (parte aérea) de NA 56-79. Quando essa variedade foi cultivada com 450 kg N.ha^{-1} , a acumulação de N na sua biomassa promoveu um aumento do IAF, mais isto não acarretou um aumento na taxa de Assimilação Líquida (TAL), quando comparada com o tratamento testemunha, e como mencionado previamente reduziu a sua EU_N .

2.3. INTERRELAÇÕES ENTRE N E CRESCIMENTO

2.3.1. Absorção, assimilação e distribuição de formas de N em relação ao crescimento

Em geral, as plantas podem absorver tanto as formas oxidadas como reduzidas do N mineral predominantes na

solução do solo (NO_3 ou NH_4). Entretanto, as consequências metabólicas e produtivas são marcadamente diferentes (HAGEMAN, 1984). Essas diferenças incluem a produção de matéria seca, sua distribuição entre raiz e parte aérea, sua composição mineral e orgânica e suas relações hídricas (FERNANDES e ROSSIELLO, 1986).

Existe evidência de que, na mesma faixa de pH, as plantas absorvem NH_4 com maior rapidez que NO_3 (HAGEMAN, 1984). Como já mencionado (item 2.3) em condições de campo, as raízes adquirem predominantemente NO_3 a partir da solução do solo, ainda que, a qualquer tempo, haja uma certa concentração de NH_4 na mesma (GOYAL e HUFFAKER, 1984). Uma descrição detalhada dos eventos ligados à absorção e assimilação do N está contida em várias revisões recentes sobre a matéria (SCHRAEDER, 1984; HAGEMAN, 1984), incluindo possíveis efeitos tóxicos por excesso de absorção de ambas as formas (NH_4 ou NO_3) (GOYAL e HUFFAKER, 1984). Com relação à cana-de-açúcar, o tópico foi revisado por SILVEIRA *et alii* (1984 e 1985).

A absorção de NO_3 , como a de anions em geral, é um processo dependente de energia metabólica (FERNANDES, 1978; FERNANDES e ROSSIELLO, 1986).

Em milho, é possível modelar o influxo radicular de N através da consideração da Taxa de Assimilação Líquida (TAL), da relação entre as áreas foliar e radicular e da relação entre a Taxa de Acumulação de N (TAN) e a Taxa de Crescimento Absoluta (TCA) (MANZATTO, 1987). Em cana, entretanto, SILVEIRA (1985) observou que nos períodos de maior

absorção de N, a TAL foi pouco afetada pelo processo de absorção. A TAN mostrou grande diferença a favor do tratamento com alta aplicação de N (450 kg N.ha^{-1}) em relação a testemunha (0 kg N.ha^{-1}) até os 150 dias após plantio (DAP), sendo que posteriormente, ambas as taxas declinaram bruscamente. Entretanto, quando a TAN foi expressa por unidade de N previamente absorvido ($\text{g N.g}^{-1} \text{ N.dia}^{-1}$) os valores resultaram muito próximos, com um padrão idêntico de variação caracterizado por uma curva em forma de sino. Os máximos ocorrem aos 150 DAP, de crescendo bruscamente depois dessa data. O autor interpretou esses resultados como sugestão da existência de um controle fisiológico sobre o processo de absorção, possivelmente determinado a nível genético (SILVEIRA, 1985).

Em milho foi possível determinar que híbridos com alta taxa de crescimento tinham consistentemente maiores valores de fluxo e menores áreas radiculares por unidade de N absorvido, em comparação a híbridos de baixa taxa de crescimento, nos quais existia uma situação reversa (baixo influxo, alta área radicular por unidade de N absorvido) (MANZATTO, 1987). Existe então um certo mecanismo compensatório segundo o qual um valor baixo de fluxo de N (expresso como $\text{g.N.cm}^{-2} \text{ raiz . dia}^{-1}$ ou unidades equivalentes) pode ser compensado por um aumento na área ou volume radicular (MANZATTO, 1987), numa feição similar à relação existente entre a taxa de fotossíntese e o IAF, já mencionada no item 2.5. Aparentemente, dentro de certos limites, o valor do influxo radicular de N é controlado pelo valor da concentração do NO_3 na solução externa (RO-

BINSON, 1986), mas também o é pelo tamanho da demanda metabólica imposta pela taxa de crescimento da planta (RUSSELL, 1977).

A baixos valores de concentração de N na solução, os influxos serão baixos, e a planta responde investindo uma maior quantidade de C e N em crescimento radicular, o que se traduz em um aumento da relação raiz : parte aérea (MANZATTO, 1987). A altos valores de concentração de N na solução, os influxos serão correspondentemente altos e a planta aplica recursos energéticos diretamente na absorção do nutriente, com menor investimento em tamanho radicular. (MANZATTO, 1987). Dados nessa direção parecem estar faltando para cana-de-açúcar, e podem ser elucidativos no esclarecimento das relações existentes entre absorção de N, crescimento e eficiência de utilização do nutriente.

Uma vez absorvido, uma fração do NO_3 é assimilada na própria raiz e aplicada no seu processo de crescimento, alocando-se preferencialmente em regiões meristemáticas (CLEMENTS, 1980; MENGEL e KIRBY, 1982). A fração remanescente é translocada via xilema à parte aérea onde se verifica a sua acumulação no colmo, durante as fases iniciais do crescimento (SILVEIRA, 1985). Este acúmulo inicial de NO_3 no colmo pode ter um papel regulador no influxo de NO_3 à bainha foliar (SILVEIRA, 1985), de forma análoga à acumulação de NO_3 em rizomas de *Paspalum notatum* (FERNANDES et alii, 1985).

O período de máximo crescimento radicular em cana ocorre durante os primeiros 3-4 meses pós-plantio, coincidente com a aparição de colmos secundários, os quais con-

trolam a taxa de iniciação de novas raízes (GASCHO e SHIH, 1983).

Justamente neste período ocorrem os picos de máxima capacidade radicular para absorção de nutrientes (HUMBERT, 1974; CLEMENTS, 1980; GASCHO e SHIH, 1983; SILVEIRA, 1985).

Concomitantemente, o aparelho fotossintetizante representado pela área foliar desenvolve-se rapidamente. Aos 4 meses os valores de IAF observados em NA 56-79 são da ordem de 1,8 - 2,5, para cana plantada em outubro, o que representa aproximadamente 50% do IAF máximo, que é atingido por volta dos 6-8 meses pós-plantio (SILVEIRA, 1985). Considerando-se um coeficiente de absorção da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) igual a 0,92, determinado para NA 56-79 por MACHADO *et alii* (1985), pode-se inferir que a idade de 4 meses a área foliar expandida pode estar absorvendo de 70 a 90% da RFA incidente (Figura 12).

A esse período inicial de crescimento (0-4 meses), associa-se uma rápida assimilação foliar do N, evidenciada por altos valores de atividade da redutase do nitrato e teores crescentes de proteína solúvel (SILVEIRA, 1985). Após esse período, os teores de NO_3 declinam bruscamente em colmos, folhas e bainhas (TEIXEIRA e COBRA NETO, 1979). Nitrato não é detectado em lâminas foliares após 200 DAP e permanece a níveis muito baixos no colmo (SILVEIRA, 1985).

Em canas adultas não é detectável a presença de NO_3 marcado no colmo, quando N^{15} é suprido às raízes, sen-

do que a maioria do N encontra-se na forma de N-amida (BULL e GLASZIOU, 1975). As proporções de N-mineral e N-orgânico nos tecidos, em qualquer época parecem dependentes da concentração de NO_3 na solução do solo, por ocasião da emergência ou nos 2-3 meses subsequentes a esse evento (HUMBERT, 1974), e são afetadas pela flutuação das condições ambientais (MENGEL e KIRBY, 1982). Verificação similar, com respeito às formas de P, foi feita por CHAPIN e BIELESKI (1982) trabalhando com cevada.

As taxas de absorção e assimilação de N são de fasadas no tempo em relação ao ritmo de acumulação de matéria seca pela cultura (HUMBERT, 1974; CLEMENTS, 1980). Essa situação leva a que inicialmente as taxas de acúmulo de N sejam maiores que as taxas de acúmulo da matéria seca (HUMBERT, 1974; SILVEIRA, 1985; ALEXANDER, 1985). Esse padrão fisiológico não parece ser distintivo da cana-de-açúcar: simplesmente exprime o fato de que, numa escala de tempo, as plantas maximizam primeiro as suas funções de absorção de nutrientes, depois a sua capacidade de captação de radiação solar e posteriormente a de alocar carboidratos de reserva em órgãos específicos como colmos em cana ou raízes em beterraba (MENGEL e KIRBY, 1982).

O processo metabólico de redução de NO_3 e sua subsequente conversão em glutamato requer o equivalente a 35-38 fotons em tecidos verdes expostos à luz. Sob condições de ausência de luz, o processo opera com um custo energético duplicado (SCHRAEDER, 1984). Essa observação é de interesse para

explicar, ao menos parcialmente, os casos de falta de resposta a aplicações tardias (metade do ciclo) de N.

De forma geral, uma das respostas usuais da cana a aplicação de N é um aumento na produção de novos perfilhos (HUMBERT, 1974). Dependendo da época de aplicação, essa resposta não se traduz em aumentos definitivos da massa verde por unidade de área cultivada, porque essa brotação tardia compete desfavoravelmente com a população de colmos de maior idade (HUMBERT, 1974; BULL e GLASZIOU, 1975; GASCHO e SHIH, 1983; MacCOLL, 1976). Isto decorre do fato de que a área foliar expandida pelos colmos desenvolvidos primariamente filtra seletivamente a radiação solar, absorvendo, na parte superior do dossel, aproximadamente duas vezes mais radiação na faixa fotossinteticamente ativa do que na de infravermelho (MACHADO *et alii*, 1985), deixando portanto uma fração menor de radiação útil aos perfilhos desenvolvidos tardiamente. Quando o N é aplicado entre o plantio e os primeiros 3-4 meses de crescimento, se estabelece precocemente uma população de colmos de idade fisiológica mais uniforme (ALEXANDER, 1985). Embora uma certa fração dos mesmos seja eliminada na competição por fatores de crescimento, a população restante propicia uma rápida expansão do IAF (SHIH e GASCHO, 1980). Isto por sua vez, inibe o crescimento de invasoras, melhora a eficiência de uso da água, acelera as taxas de crescimento e determina uma proporção maior de colmos mais velhos por ocasião da colheita, o que provavelmente acarretará uma melhor qualidade do caldo (HUMBERT, 1974; BULL e GLASZIOU, 1975; MacCOLL, 1976;

GASCHO e SHIH, 1983; SILVA e CASAGRANDE, 1983; ROSSIELLO et alii, 1983; ALEXANDER, 1985).

2.3.2. Redistribuição do N absorvido

Na Figura 6 estão agrupados dados de três experimentos (CATANI et alii, 1959; ORLANDO Fº et alii, 1980 e SILVEIRA, 1985). Esses trabalhos fornecem dados periódicos de acumulação de matéria seca em colmos e folhas e percentuais de N em cada uma dessas frações da biomassa.

A partir desses dados, foram calculadas as taxas de crescimento absoluto (TCA) do colmo e a correspondente relação média N-colmo/N-P.aérea para cada período de amostragem. Os dados foram transformados em percentagens da taxa máxima para uniformizar as diferentes unidades empregadas nesses trabalhos. A relação entre essas variáveis é exponencial e significativa ($p < 0,01$). A regressão absorveu 50% da variabilidade nos percentuais de TCA-colmo, sendo o restante atribuível a diferenças varietais, períodos de crescimento e condições experimentais. A forma de regressão é explicável pelo ritmo diferencial da acumulação de N na biomassa em relação à acumulação de matéria seca no colmo (item 2.3).

Baixos valores da relação N-colmo/N-parte aérea correspondem a fases juvenis de crescimento, quando a alocação de N na parte aérea é prioritariamente dirigida para expansão foliar (CLEMENTS, 1980). Posteriormente, o aumento na taxa de alongação dos colmos impõe uma redistribuição do

Figura 6. Relação entre a taxa de crescimento do colmo e a relação N-colmo/N-Parte aérea.

Fontes: CATANI et alii (1959); SILVEIRA (1985); ORLANDO Fº et alii (1980).

N, sendo que a maior parte do N alocado no colmo corresponde a formas orgânicas solúveis (SILVEIRA, 1985). Taxas máximas de crescimento do colmo associam-se a relações de partição do N acumulado da ordem de 0,5-0,6 (Figura 6).

Após as taxas máximas de crescimento, a relação N-colmo/N-P.aérea continua a aumentar (Tabela 3), mesmo quando a taxa de acumulação de matéria seca no colmo tende a cair. Os níveis absolutos de acumulação de matéria seca no colmo tendem a se estabilizar por volta de 300 DAP, para cana de ciclo anual (SILVEIRA, 1985). Conforme progride a idade da cultura, as folhas mais velhas entram em processo de senescência, sendo que a área foliar por planta pode se manter estável durante certo período, devido a que a taxa de emergência de novas folhas compensa a redução de área devido a folhas senescentes (HUMBERT, 1974; MACHADO, 1981). A abscisão de folhas senescentes recicla uma quantidade anual de N ao solo, da ordem de 70 kg N.ha⁻¹ (SAMPAIO et alii, 1984; LIMA et alii, 1987).

SILVEIRA (1985) observou que após 300 DAP houve um aumento linear do teor de N- α NH₂ solúvel foliar. Esse aumento pode ser indicativo de que proteínas foliares estão sendo hidrolizadas nos seus componentes básicos (aminoácidos) durante o período de maturação da cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ASPECTOS GERAIS

3.1.1. Localização da área experimental

O experimento foi instalado em área da Fazenda Bom Jesus, pertencente à Usina São João, situada no município de Campos, região Norte Fluminense do Estado do Rio de Janeiro. A área escolhida situa-se aproximadamente a 10,0 km do perímetro urbano da cidade de Campos (Lat. 21°45'S, Long. 41°21'O e altitude: 11m) e a 5,0 km em percurso reto da margem esquerda do rio Paraíba do Sul. A área experimental, de aproximadamente 2,5 ha, é relativamente homogênea quanto as características físicas e químicas do solo, e já tem sido objeto de estudos anteriores (LOPES, 1983; MARZOLA, 1984). Dentro dessa área experimental foi escolhida uma parcela de aproximadamente 0,5 ha, que não tinha sido previamente plantada para a instalação do presente experimento.

3.1.2. Caracterização do solo

3.1.2.1. Morfológica

Com a finalidade de se observar as características morfológicas do perfil foi aberta uma trincheira com profundidade aproximada de 1,6 m. O solo é formado sobre material de origem aluvial (sedimentos quaternários) de textura franco argilosa, uniforme ao longo da secção de controle (0-1,0 m, Figura 8). O horizonte superficial (Ap), com espessura de 0,2 m, é de cor pardo-escura (10,0 YR 3/3), a pardo-amarelada (10,0 YR 4/3), com estrutura moderada, média, de blocos subangulares. O horizonte sub-superficial é Cambico, sendo subdividido em três sub-horizontes; B₂₁ (0,2 - 0,6 m); B₂₂ (0,6 - 1,0 m) e B₂₃ (1,0 - 1,6 m) cor úmida: 10,0 YR 5/6 a 5/8, com estrutura moderada, média em blocos angulares. A partir do horizonte B₂₂ (0,6 m) existe mosqueamento (10,0 YR 7/1), indicativo de lençol freático oscilante. Estas características enquadram o solo no Sistema Brasileiro como Cambissolo Eutrófico (Natric Eutrochrepts no Sistema Americano), conforme a descrição do perfil modal feita por RAMOS e CUNHA (1985).

3.1.2.2. Física

Nas Figuras 7 e 8 são mostrados os valores de densidade global $\rho_g(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ e teores de argila e areia ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$ solo) correspondentes a amostras tomadas a intervalos de 0,1 m na seção de controle (0 - 1,0 m). Os valores são

Figura 7. Variação da densidade global $\rho_g(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ do solo, entre 0 e 1,0 m de profundidade do perfil.

Figura 8. Variações dos teores de areia (■) e argila (●) total do solo, entre 0 e 1,0 m de profundidade do perfil.

médias de três repetições, determinados segundo a metodologia descrita pelo Manual de Métodos de Solo (Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, 1979). A densidade específica da fração sólida foi determinada volumetricamente, indicando um valor médio de $2,35 \pm 0,04 \text{ g.cm}^{-3}$.

Foram tomadas amostras combinadas, representativas das camadas 0-0,2; 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m para a obtenção das curvas características da função $\theta = \theta(\psi_m)$ para valores de potencial matricial (ψ_m) de 10^{-2} , 3×10^{-2} , 10^{-1} , 3×10^{-1} , 6×10^{-1} e 1,5 MPa respectivamente. Os valores de umidade, obtidos de forma gravimétrica, foram convertidos para $\theta (\text{cm}^3 \cdot \text{água} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ solo})$ pelo uso dos valores médios de ρ_g para cada camada (Figura 7) e são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Variação do conteúdo volumétrico de umidade, θ , em função do potencial matricial de água para as camadas 0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m do solo.

Prof. (m)	$\theta (\text{cm}^3 \cdot \text{água} \cdot \text{cm}^{-3} \text{ solo})$					
	$\psi_m (- \text{MPa})$					
	10^{-2}	3×10^{-2}	10^{-1}	3×10^{-1}	6×10^{-1}	1,5
0 - 0,2	0,70	0,596	0,504	0,430	0,390	0,343
0,2 - 0,4	0,696	0,595	0,501	0,428	0,387	0,339
0,4 - 0,6	0,703	0,590	0,490	0,410	0,367	0,318
0,6 - 0,8	0,713	0,587	0,475	0,413	0,347	0,295
Média	0,703	0,593	0,493	0,420	0,373	0,324

Uma análise de variância indicou a inexistência de diferenças significativas entre profundidades, de tal forma que os valores foram combinados para a obtenção de uma curva comum (0-0,8 m). A curva característica e a equação descritiva são mostradas na Figura 9.

Considerando-se uma profundidade efetiva de enraizamento de 0,6 m, a capacidade máxima de armazenamento de água do solo, é equivalente a uma lâmina de 156 mm.

Figura 9. Relação entre a umidade volumétrica Θ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) e o potencial matricial Ψ_m ($-\text{MPa}$) para a fração terra fina do solo do presente experimento.

3.1.2.3. Química

A área experimental foi dividida em 12 sub-áreas, com 450 m^2 (30 m, direção N-S, x 15 m, direção L-O), de cada uma das quais foram tomadas 3 amostras combinadas às profundidades 0-0,2 e 0,2-0,4 m. Tais amostras foram analisadas para Al, Ca, Mg, Na, K, P e pH (1:2,5 água) no Laboratório de Fertilidade do Departamento de Solos da U.F.R.R.J., segundo a metodologia descrita pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo (1979). Teores de N-total foram determinados pelo método de Kjeldahl (BRENNER, 1965), usando-se H_2SO_4 0,049332 N como titulante. A condutividade elétrica foi medida no extrato proveniente da filtração a vácuo da pasta saturada, e seu valor corrigido para 25°C. O teor de C orgânico foi determinado em quatro repetições, por oxidação, com bicromato de potássio 0,4 N em meio sulfúrico e sulfato ferroso 0,1 N como titulante, obtendo-se os valores de 16,8 e 12,5 mg.g^{-1} solo para as camadas 0-0,2 e 0,2-0,4 m respectivamente.

Os valores obtidos na caracterização química do solo são mostrados na Tabela 5. Os coeficientes de variação obtidos para as análises feitas, oscilaram de forma geral entre 10 e 20%, não tendo sido observados gradientes de fertilidade significativos entre as subparcelas. Os dados obtidos indicam o caráter eutrófico deste solo (percentagens de saturação de bases acima de 50% nos primeiros 0,4 m do perfil), confirmando resultados de análises anteriores (LOPES,

Tabela 5. Características químicas do solo experimental.

Análise ⁽¹⁾	Profundidade (m)	
	0-0,2	0,2-0,4
C.E. (mmhos.cm ⁻¹)	1,21(16,4)	0,91(19,4)
pH H ₂ O	5,10(4,1)	4,92(6,7)
Acidez Trocável		
(meq.100g ⁻¹ .solo)		
Al	0,11(17,2)	0,18(27,2)
H	5,57(22,2)	3,72(20,6)
Total	5,68(15,7)	3,90(23,9)
Bases Trocáveis		
(meq.100g ⁻¹ solo)		
Ca	4,80(14,1)	4,98(17,6)
Mg	2,33(13,1)	2,08(15,9)
K	0,11(18,0)	0,07(14,1)
Na	0,06(15,5)	0,03(20,5)
Total	7,30(17,6)	7,16(22,0)
CTC efetiva(2)	12,98(16,5)	11,06(22,1)
Saturação de Bases (%)	56,2	64,7
P (µg g ⁻¹ solo)	44,0(19,6)	32,0(10,5)
N (µg.g ⁻¹ solo)	1400 (11,7)	1192 (7,6)
Relação C/N	12,0	10,5

(1) Valores médios de 12 repetições. Os números entre parênteses indicam os CV (%) correspondentes)

(2) CTC efetiva (meq.100g⁻¹ solo) = Acidez trocável + Bases trocáveis

1983; MARZOLA, 1984). Deve ser observado, entretanto, que os teores de P e K são relativamente baixos.

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1. Preparo do solo

O preparo do solo consistiu de uma subsolagem a uma profundidade média de 0,5 m e uma aração a 0,3 m de profundidade, seguida de uma gradagem cruzada.

3.2.2. Orientação e tamanho das parcelas

As parcelas foram dispostas na direção Leste-Oeste, compondo-se de 8 linhas de 15 m de comprimento, com uma distância de 1,5 m entre elas (Figura 10).

A sulcagem foi feita a 0,3 m de profundidade. As parcelas foram separadas por ruas laterais de 3,0 m de largura, no intuito de prevenir possíveis diferenças na radiação solar interceptada entre parcelas adjacentes, devido ao crescimento diferencial do dossel vegetativo (TOVEY et alii, 1973).

Das 8 linhas de cada parcela, as duas extremas (nº 1 e 8, Figura 10) foram consideradas bordaduras externas. A segunda e sétima linha foram destinadas às colheitas mensais da biomassa (item 3.2.6), as linhas nº 3 e 6 foram consideradas bordaduras internas e as duas linhas centrais (nº 4

SULCO Nº1

Figura 10. Dimensões da parcela experimental e disposição dos sulcos para amostragem de acumulação mensal de bio massa e produção final de cana.

-5) foram destinadas à colheita final. Na extremidade das linhas foi excluída uma bordadura de 1,0 m. Assim, em cada parcela ($157,5 \text{ m}^2$), houve uma área efetiva de 78 m^2 . Metade dessa superfície foi destinada à colheita final de biomassa e metade, a sua mensuração mensal.

3.2.3. Adubação basal

Previamente ao plantio, foi feita uma aplicação dos seguintes nutrientes: P ($150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$; como superfosfato simples), K ($180 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$; como cloreto de potássio) e Zn ($4,6 \text{ kg Zn} \cdot \text{ha}^{-1}$, como sulfato de zinco). Esses níveis de adubação foram definidos em função de resultado experimental prévio (MARZOLA, 1984), obtido em solo adjacente ao do presente experimento. A aplicação de Zn foi baseada na observação prévia de que a concentração desse nutriente no meristema apical de plantas de cana é adversamente afetada pela elevação do nível de P no solo (LOPES, 1983).

3.2.4. Plantio e tratos culturais

O plantio foi realizado em 20/08/83, a partir de toletes de variedade NA 56-79, oriundos de viveiro primário, numa densidade média de 12 gemas por metro de sulco. Previamente, os toletes foram tratados com uma solução de Benlate (Benomyl, 1 kg de produto ativo por 1.600 l água). Aos 90 DAP foram liberadas no local 2×10^3 pupas $\cdot \text{ha}^{-1}$ de *Apanthe*

les flavipes para controle de *Diatraea saccharalis*. Capinas para controle de invasoras (principalmente *Cyperus* spp.) foram realizadas de forma manual.

Foram feitas cinco irrigações durante a fase de crescimento da cultura. O volume de água aplicado foi determinado a partir de medições gravimétricas do teor de água no solo. Em todos os casos, foi aplicada uma lâmina equivalente à restituição da capacidade de campo ($3,0 \times 10^{-2}$ MPa, Tabela 4) a uma profundidade de 0,6 m. Essas irrigações foram feitas nos meses de setembro de 1983 e fevereiro, março, abril e maio de 1984.

3.2.5. Tratamentos e delineamento experimental

Foram considerados três tratamentos, correspondentes a três níveis de aplicação de N.

- a) Testemunha: recebeu apenas a adubação basal, indicada no item 3.2.3.
- b) Nível intermediário de N: 120 kg N.ha^{-1} , na forma de uréia (45% de N).
- c) Nível elevado de N: 240 kg N.ha^{-1} , na mesma forma de aplicação.

Inicialmente, foi planejada a aplicação de metade da dose aos 60 DAP e o restante aos 90 DAP. Houve, entretanto, um excesso de chuva no mês de outubro de 1983, que obrigou ao adiamento da primeira aplicação até os 93 DAP, sendo o restante aplicado aos 123 DAP.

Os tratamentos foram dispostos em forma de blocos ao acaso, com oito repetições. Para análise de variância, utilizou-se o delineamento fatorial, onde cada época de coleta constituiu-se em subtratamento. Para finalidade de análise de crescimento, foram obtidos dados de quatro repetições, devido à impossibilidade de se processar, ao mesmo tempo, o volume total da biomassa colheitável a partir das oito repetições. Os dados de produção final e as análises tecnológicas de qualidade do caldo são baseados nas oito repetições indicadas (item 3.2.8).

3.2.6. Amostragem de plantas

A avaliação da produção da biomassa total, da parte aérea (B_T , $g.m^{-2}$) foi realizada através de amostragens mensais, a partir dos 90 DAP, sendo portanto a primeira amostragem anterior à aplicação do N. Previamente à colheita, os sulcos reservados para essa finalidade (nºs 2 e 7, Figura 10) foram divididos, em posições amostrais alternadas, de 1,0 m de comprimento ($1,5 m^2$ de terra), havendo 13,0 m de comprimento efetivo em cada sulco. As posições de amostragem foram sorteadas previamente, sendo as colheitas feitas de forma alternada, entre os dois sulcos mencionados. Houve um total de onze colheitas mensais: 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360 e 390 DAP.

Em cada data, seguiu-se o seguinte procedimento de rotina:

a) Medição da altura do colmo, desde o nível do solo até a inserção da folha +1 (sistema de Kiujper, ORLANDO Fº e ZAMBELLO Jr., 1983b).

b) As plantas foram cortadas rente ao nível do solo, levadas à sombra e separadas em lâmina foliar (corte ao nível da lígula) e colmos + bainhas.

c) Pesagem da biomassa fresca. O peso de folhas e bainhas senescentes ou secas foi também registrado separadamente e seu valor incluído na estimativa de B_T .

d) Tão rápido quanto possível, o material foi passado em uma picadora de forragem e uma subamostra (geralmente entre 0,5 e 1,5 kg de peso fresco) foi separada, pesada e conservada em geladeira até o momento da secagem. A secagem foi executada em estufa com circulação forçada de ar a 70°C pelo prazo mínimo de sete dias. Subsequentemente, a partir da relação peso seco/peso fresco da subamostra, foi estimado o peso seco de B_T .

e) Contagem do número de colmos por metro linear de sulco. Foram contados o total de colmos (primários e secundários), numa seção de controle de 10,0 m, previamente delimitada e duplicada nas linhas centrais (nºs 4 e 5, Figura 10) da parcela.

A avaliação do Índice de Área Foliar (IAF) foi realizada através da determinação do peso seco de folhas (PSF) e da Área Foliar Específica (AFE, $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ folha), segundo a fórmula:

$$AFT = 295,83 + 97,79 \text{ PSF} \quad (1)$$

onde AFT representa a área foliar total por colmo e PSF o peso seco da massa foliar

Para estabelecer a equação (1), a AFT foi estimada pela fórmula:

$$AFT = \sum_{i=1}^n (L \times C)_n \times 0,684 \quad (2)$$

onde L e C representam a máxima largura e comprimento de todas as folhas funcionais (mais do que 50% de área verde, estimada visualmente) por colmo. O fator 0,684 é o valor da regressão da área retangular (LxC) pela área real da folha, estimada através do método planimétrico (EVANS, 1972), num total de 250 folhas, representando valores de AF entre 12 e 5300 cm².

O desenvolvimento da equação (1) foi feito a partir da medição de 132 colmos (Figura 11a). Ambos os coeficientes de regressão resultaram significativos pelo teste t ($p \leq 0,001$) e foram portanto retidos na equação (1). A validade da equação (1) foi testada, durante o ano de 1985 contra medições independentes de AFT, realizadas com um medidor eletrônico de área (Área Metter, modelo Li-3000, Li-Cor Inc.). As medições foram efetuadas num talhão comercial plantado com a mesma cultivar, em solo similar, previamente adubado com 120 kg N.ha⁻¹. Na Figura 11b é mostrado o resultado dessa calibração: a partir de 181 observações pareadas, ambos os méto

Figura 11a. Relação entre a área foliar e o peso seco de folhas de cana-de-açúcar cv. NA 56-79.

Figura 11b. Relação entre a AFT estimada pelo emprego da equação $AFT = 295,73 + 97,79 P_F$ (Figura 11a) e a AFT medida diretamente com um integrador eletrônico de área.

dos correlacionaram com um coeficiente de 0,972, sendo que a pendente da regressão ($1,022 \pm 0,20$) não se afastou significativamente do valor unitário. A média dos resultados de AFT pelo emprego da equação 1 diferiu em 5,4% dos resultados obtidos pela medição direta da Área Foliar (Figura 11b).

A partir da determinação da AFT, o IAF foi obtido pela seguinte expressão:

$$\text{IAF} = \text{AFT} \times N \quad (3)$$

onde N representa o número médio de colmos por unidade de superfície.

As colheitas de biomassa foram feitas sempre no horário da manhã, entre as 6:00 e 9:00 horas. Por ocasião da última colheita (390 DAP), foi feita uma amostragem do sistema radicular para avaliação da sua biomassa. Após o corte da parte aérea foi realizada uma escavação às profundidades de 0-0,2 m e 0,2 - 0,4m; retirando-se de cada camada um volume de solo de 0,066 m³. A massa de raízes assim recuperada foi clarificada sob jato de água corrente. Uma subamostra foi agitada durante 48 horas em solução de metafosfato de sódio (WILHELM *et alii*, 1982) e subsequentemente submetida a secagem (70°C, em estufa com circulação forçada de ar).

3.2.7. Determinações analíticas

3.2.7.1. No material vegetal

O material seco de ambas as porções da parte aérea (folha e colmo + bainha) foi moído (Wiley, 40 mesh) e submetido a digestão para determinação dos teores de N e K totais. Duas subamostras foram separadas e submetidas a digestão sulfo e nitroperclórica respectivamente (RODELLA, 1983). No extrato da primeira digestão, foi determinado o teor de N por técnica de microKjeldahl, usando-se H_2SO_4 0,0195N como titulante. No extrato nitro-perclórico, uma alíquota foi diluída convenientemente e o teor de K determinado por fotometria de chama (SARRUGE e HAAG, 1974).

A determinação do conteúdo do nutriente acumulado em cada fração da biomassa considerada foi obtida pela expressão:

$$U_{N,K} = C_{N,K} \times B_{F,C} \quad (4)$$

onde $U_{N,K}$ representa o conteúdo total de N ou K acumulado em folhas e/ou colmos, $C_{N,K}$ a concentração do nutriente na fração considerada e $B_{F,C}$ a biomassa seca da mesma.

3.2.7.2. No solo

Os teores de NO_3 e NH_4 presentes no solo foram seguidos a partir de 150 DAP, até os 330 DAP, em conexão com

as amostragens mensais de biomassa nesse período. Foram tomadas as amostras representativas das camadas 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, sempre no fundo do sulco. As amostras foram conservadas sob refrigeração até o momento da sua secagem. Após peneiramento, os teores de N-mineral foram determinados pelo método de BREMNER e KEENEY (1965), por extração com KCl 2N.

3.2.8. Colheita final e análises tecnológicas

A colheita final foi realizada aos 405 DAP (13,5 meses após o plantio), cortando-se os colmos dos dois sulcos centrais de cada parcela, conforme indicado anteriormente (item 3.2.5).

Previamente, foram selecionados 10 colmos por parcela, para a determinação de sua qualidade industrial. Os colmos foram moídos em picadora de forragem, e do material triturado e homogeneizado foi tomada uma amostra de 0,5 kg. Essa amostra foi levada ao laboratório e o caldo extraído com emprego de prensa hidráulica (250 kgf.cm^{-2} durante 1 minuto) (TANIMOTO, 1964). O caldo foi filtrado e analisado para Brix % caldo por refractometria. Pol % caldo foi determinado após clarificação do mesmo, com auxílio de um sacarímetro digital. O bagaço resultante da extração na prensa hidráulica foi então pesado e subsequentemente seco em estufa com circulação forçada de ar a 85°C até peso constante (MARZOLA, 1984).

Fibra % cana foi obtida através da fórmula:

$$\text{Fibra \% cana} = \frac{100 \text{ P.U.} - \text{P.S.} \cdot b}{5(100-b)} \quad (5)$$

onde: P.U. = peso úmido do resíduo fibroso da prensagem;

P.S. = peso seco do resíduo fibroso;

b = brix % caldo.

Pol % cana foi determinado pela fórmula:

$$\text{Pol \% cana} = \text{pol \% caldo} \frac{(1 - \text{Fibra \% cana})}{100} \quad (6)$$

Pureza do caldo foi calculada pela fórmula:

$$\text{Pureza (\%)} = \frac{\text{Pol \% caldo}}{\text{Brix \% caldo}} \times 100 \quad (7)$$

Os teores de açúcares totais (AT) e redutores (AR) no caldo foram determinados pelo método descrito por MEADE (1981). Para a análise de AT, uma amostra de 25 ml de caldo foi tratada com 5 ml de HCl concentrado a 65°C. A seguir, a solução foi neutralizada com NaOH a 20%. AT e AR foram medidos por titulação com solução de Fehling, usando-se azul de metileno como indicador. AT % cana e AR % cana foram calculados pelas fórmulas:

$$\text{AT \% cana} = \text{AT \% caldo} \frac{(1 - \text{Fibra \% cana})}{100} \quad (8)$$

$$\text{AR \% cana} = \text{AR \% caldo} \frac{(1 - \text{Fibra \% cana})}{100} \quad (9)$$

3.3. DEFINIÇÕES E SIMBOLOS USADOS NA ANÁLISE DE CRESCIMENTO

Se B_T representa a biomassa total acumulada na parte aérea por unidade de superfície, ela pode ser expressa como (WARREN WILSON, 1981):

$$B_T = P_T \times N \quad (10)$$

onde P_T é o peso médio da matéria seca de uma planta (g.planta^{-1}), o qual será denominado a partir daqui de peso seco e N o número médio de plantas por unidade de superfície (planta.m^{-2}).

P_T é derivado da equação 10:

$$P_T = \frac{B_T}{N} \quad (11)$$

Por outro lado, B_T é a soma da biomassa de folhas (B_F) e colmos + bainhas (B_C), ou seja:

$$B_T = B_C + B_F \quad (12)$$

Considerando-se a derivada primária de B_T em relação ao tempo, define-se a Taxa de Crescimento da Cultura (TCC, $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$):

$$\text{TCC} = \frac{d B_T}{dt} \quad (13)$$

E similarmente, quando se considera a derivada primeira da função $P_T = f(t)$, obtem-se a Taxa de Crescimento Absoluto (TCA, g.dia^{-1}) de uma planta individual (HUNT, 1978):

$$TCA = \frac{d P_T}{dt} \quad (14)$$

Quanto a TCA é expressa por unidade de P_T previamente acumulado, obtém-se a Taxa de Crescimento Relativo (TCR, $\text{g.g}^{-1}.\text{dia}^{-1}$) de uma planta individual (HUNT, 1978):

$$TCR = \frac{1}{P_T} \cdot \frac{d P_T}{dt} = \frac{1}{P_T} \cdot TCA \quad (15)$$

Assim como uma planta isolada é um componente de uma população, TCR é um componente da TCC, e o outro é B_T , ou seja a biomassa seca por unidade de superfície (WARREN WILSON, 1981), de acordo com as seguintes equações:

$$TCC = B_T \times TCR \quad (16)$$

ou:

$$N \frac{d P_T}{dt} = N \cdot P_T \frac{1}{P_T} \frac{d P_T}{dt} \quad (17)$$

Dessa forma, TCR fica definido pela relação entre TCC e B_T :

$$TCR = \frac{TCC}{B_T} \quad (18)$$

A TCC (eq. 13) pode ser subdividida segundo a expressão (HUNT, 1978):

$$TCC = IAF \cdot TAL \quad (19)$$

onde IAF (Índice de Área Foliar, m^2 folha $.m^{-2}$ terra) foi definido previamente (equação 3) e TAL é a Taxa de Assimilação Líquida da Cultura ($g.m^{-2}$ folha $.dia^{-1}$), e vale:

$$TAL = \frac{1}{IAF} \frac{d B_T}{dt} \quad (20)$$

ou,

$$TAL = \frac{TCC}{IAF} \quad (21)$$

De forma similar, a TCR (equação 15) pode ser dividida em dois componentes, a TAL e a Razão de Área Foliar (RAF, m^2 folha $.g^{-1}$):

$$\frac{1}{P_T} \frac{d P_T}{dt} = \frac{1}{AFT} \cdot \frac{d P_T}{dt} \cdot \frac{AFT}{P_T} \quad (22)$$

ou

$$TCR = TAL \times RAF \quad (23)$$

Desde que $IAF = AFT \times N$ (equação 3) e $B_T = P_T \times N$ (equação 10), a TAL calculada a partir das equações (21) e (22) possui o mesmo valor:

$$\frac{1}{AFT \cdot N} N \frac{d P_T}{dt} = \frac{1}{AFT} \frac{d P_T}{dt} \quad (24)$$

A análise de crescimento de uma comunidade vegetal pode ser feita em termos da matéria seca total acumulada por unidade de superfície cultivada (B_T), ou de um componente parcial da mesma (EVANS, 1972; THORNLEY, 1976; HUNT, 1978). Considerando-se ser U a quantidade total de um dado nutriente acumulado na biomassa, por unidade de superfície (equação 4), pode-se definir:

U = conteúdo total de nutriente acumulado na biomassa B_T
(g.U.m⁻²)

$$TAA_U = \frac{dU}{dt} \quad (25)$$

$$TAR_U = \frac{1}{U} \frac{dU}{dt} \quad (26)$$

$$TUE_U = \frac{1}{U} \frac{dB_T}{dt} \quad (27)$$

onde TAA_U representa a Taxa de Acúmulo Absoluto do nutriente (g U.m⁻².dia⁻¹), TAR_U a Taxa de Acúmulo Relativo (g.U.g⁻¹ U.dia⁻¹) e TUE_U , a Taxa de Utilização Específica (g.M.S.g⁻¹ U.dia⁻¹). Desde que $\frac{dB_T}{dt}$ é a expressão da TCC (eq. 13); a equação 25 pode ser escrita como:

$$TUE_U = \frac{TCC}{U} \quad (28)$$

3.4. EFICIÊNCIA DE INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A eficiência de absorção da radiação solar incidente foi determinada através das equações mostradas na Figura 12. Nessa figura é apresentada a relação fracional de atenuação da radiação solar incidente numa comunidade de cana (cv. NA 56-79) em relação ao IAF desenvolvido pela cultura. As curvas são do tipo geral

$$R_{\text{int } Z} = R_I [1 - e^{(-k \text{ IAF})}] \quad (29)$$

onde $R_{\text{int } Z}$ representa a densidade de fluxo de radiação incidente sobre um plano horizontal Z abaixo de uma superfície foliar com um dado IAF. A constante k é o coeficiente de absorção da radiação solar (MACHADO, 1981; WARREN WILSON, 1981). R_I é a radiação solar incidente ao nível do topo da cultura. O modelo foi proposto por MONSI e SAEKI (1953). Os coeficientes de absorção para radiação solar global ($k_{Rg} = 0,67$) e radiação fotossinteticamente ativa ($k_{RFA} = 0,92$) são valores médios determinados por MACHADO et alii (1985) em cana, quando a cultura tinha 13 meses de idade e um IAF de 3,7. Na mesma figura estão indicados resultados de medições de atenuação da RFA pela variedade CB 45-3, a vários níveis de IAF (ROSSIELLO et alii, 1983). Esses dados foram obtidos diretamente com um sensor de RFA corrigido por coseno. Os

Figura 12. Curvas de absorção de radiação solar global (R_g), ou radiação fotossinteticamente ativa (RFA), para uma comunidade de cana-de-açúcar (cv NA 56-79) em função do Índice de Área Foliar (IAF). A partir de MACHADO et alii (1985). ●, dados obtidos de ROSSIÉLO et alii, 1983; ▲ dados não publicados do autor.

resultados indicam certa similaridade entre os valores de k_{RFA} em ambos os experimentos citados.

3.5. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Análises de regressão, de normalidade de distribuição das variáveis, teste t, análises de variância (teste F), teste de Tukey e coeficientes de correlação foram desenvolvidos por emprego dos programas SYSTAT (SYSTAT, Inc.) e MICROSOFT EXCEL (MICROSOFT Corp.).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CONDIÇÕES AMBIENTAIS DURANTE O PERÍODO DE CRESCIMENTO

Na Tabela 6 encontram-se indicados os valores das variáveis climáticas, medidas ou estimadas, durante o período experimental (agosto/83 - outubro/84), a partir de registros obtidos na Estação Campos (INEMET) e na Estação Experimental "F.M. Veiga" (EEFMV, IAA/Planalsucar), distantes aproximadamente 6,0 e 15,0 km respectivamente do local experimental.

Em relação à radiação solar global (R_g), os valores médios mensais durante o período, incluem-se dentro dos limites de variação dos valores médios da série estimada para o período 1960-85, a partir da razão de brilho solar e medições diretas de R_g obtidas na EEFMV durante o período 1975-85 (Figura 13a). A única exceção foi o mês de setembro/83, mas nesse mês a cultura estava em fase de emergência, não tendo portanto influenciado na expressão dos resultados. As densidades de fluxo de R_g máximas ocorreram nos meses de janeiro

Tabela 6. Valores médios de evapotranspiração potencial, radiação solar, deficit de saturação do ar, temperatura, brilho solar, velocidade do vento e total de chuva mensal durante o período experimental (agosto/83 - outubro/84).

Mês	Precipitação mm.mês ⁻¹	ET ₀ (1) mm.dia ⁻¹	Temperatura do ar (°C)		Brilho solar h.	D.S.(2) m.bar	Radiação solar (cal.cm ⁻² .dia ⁻¹)		Vel. vento Km.h ⁻¹	
			min.	máx. média			Global	Líquida		
Agosto	5,8	3,59	15,3	27,9	22,3	7,1	5,1	435	271	8,8
Setembro	196,0	3,49	18,4	29,4	21,6	2,1	2,7	269	173	8,7
Outubro	268,2	3,12	19,9	26,8	23,9	4,3	3,9	424	265	n.d.(3)
Novembro	161,2	4,51	21,2	29,4	25,7	5,4	5,0	485	301	7,9
Dezembro	238,8	4,04	22,0	30,2	26,4	5,0	4,5	491	304	8,4
Janeiro	88,0	5,18	22,3	33,0	28,1	8,6	14,7	615	377	9,3
Fevereiro	34,7	6,05	22,9	32,2	28,1	8,9	6,2	604	372	8,0
Março	75,0	4,89	21,3	33,0	26,8	7,3	6,3	475	297	6,7
Abril	29,2	4,07	20,0	28,7	24,5	5,3	4,6	396	228	7,6
Maio	19,5	3,38	20,8	32,0	25,0	5,9	5,5	376	237	5,4
Junho	12,6	3,23	19,2	29,8	23,2	6,4	4,9	331	210	4,3
Julho	20,4	3,28	18,4	28,2	22,4	6,8	4,7	340	215	6,2
Agosto	20,6	4,07	17,0	25,7	21,2	4,4	3,8	320	203	8,0
Setembro	21,2	3,91	17,3	26,5	22,4	4,3	5,0	379	238	9,3
Outubro	37,0	4,37	20,2	28,6	24,8	5,6	3,9	463	288	8,5

(1) ET₀: evapotranspiração potencial de referência, calculada pela fórmula: $ET_0 = a + b R_g$, onde a e b são constantes de regressão e $a = m/n + \gamma$, onde m = pendente da curva de saturação de pressão de vapor vs. temperatura e γ é a constante psicrométrica. Maklind (1957), citado por BLAD (1983).
 (2) Déficit médio de saturação do ar; (3) Dado não disponível.

Figura 13a. Valores médios mensais de radiação solar global, estimados a partir de dados de brilho solar medidos na Estação Campos, RJ (INEMET), durante o período 1960-85.

e fevereiro/84, com valores médios de $0,77 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ e a mínima no mês de agosto/84, com $0,47 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$. Valores muito similares foram comunicados por SOUZA et alii (1980), baseados em registros diretos de R_g da EEFMV para o período 1975-79. Considerando-se que a fotossíntese líquida em folhas de cana livres de sombreamento apresenta um valor de saturação em torno de $0,6 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ (WALDRON et alii, 1967) pode-se concluir que a radiação solar não foi limitante, dentro do período experimental, ao crescimento da cultura. Valores mínimos de radiação solar, associados a alta demanda evapotranspirativa durante o período julho - setembro/84 (Tabela 6), concorreram para a diminuição das taxas de crescimento da cana e propiciaram condições favoráveis a sua maturação.

Valores de radiação líquida (RL) estimados para o período de crescimento (pelo método do balanço de radiação) mostram o mesmo padrão de variação. Um estudo prévio revelou existir a seguinte relação linear: $RL = 14,3 + 0,591 R_g$ ($r = 0,930^{***}$). Valores médios de RL para o mesmo período analisado para R_g (1960-85) são mostrados na Figura 13b.

Não houve, ainda, durante o período experimental, restrições térmicas ao desenvolvimento da cultura. Admitindo-se que a temperatura média basal seja de 20°C , e que valores inferiores afetem eventos produtivos significativos como germinação, expansão de área foliar, alongação do colmo, perfilhamento e fotossíntese (WALDRON et alii, 1967; BRODIE et alii, 1969; MONGELARD & MIMURA, 1971; MANIERO, 1980), ob-

Figura 13b. Valores médios mensais de radiação líquida estimados por regressão a partir de dados de brilho solar medidos na Estação Campos, RJ (INEMET). Período 1960-85.

serva-se na Tabela 6 que em nenhum mês a temperatura média atingiu esse valor. Embora houvessem condições favoráveis à indução da floração durante o período fevereiro-abril/84, segundo as condições tipificadas para a cultivar NA 56-79 (PEREIRA et alii, 1986), a mesma não foi observada em grau significativo.

Além da radiação solar e da temperatura, a disponibilidade hídrica é o terceiro fator ambiental de importância em relação ao crescimento vegetal (LEGG, 1981).

Como mostra a Tabela 6, considerando-se o período anual setembro/83 - agosto/84, houve uma precipitação total de 1164,2 mm, superior em 9% à média normal ($1067,9 \pm 226$ mm). Deste total, 74,2% concentrou-se no período setembro-dezembro/83. As precipitações ocorridas em setembro e outubro/83 tem probabilidades de ocorrência de 3,0 e 3,8% respectivamente, e foram responsáveis pelo baixo brilho solar e déficit de saturação do ar nesses meses (Tabela 6).

Em contraste, o período fevereiro-maio/84 caracterizou-se pela ocorrência de estresse hídrico, evidenciado pela baixa precipitação e alta demanda evapotranspirativa potencial (Tabela 6). Essa situação foi contornada com irrigações nesses meses. Isto permitiu à cultura a manutenção de taxas de crescimento, que, como será discutido posteriormente, ficaram apenas na dependência da disponibilidade de nutrientes no seu sistema radicular.

4.2. ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA

4.2.1. Parte aérea

A produção total de biomassa seca da parte aérea (folhas, colmos e bainhas foliares) é mostrada na Tabela 7, em função dos três níveis de N aplicados ($N_0 = 0 \text{ kg N.ha}^{-1}$; $N_1 = 120 \text{ kg N.ha}^{-1}$ e $N_2 = 240 \text{ kg N.ha}^{-1}$).

Houve diferenças significativas entre os tratamentos adubados e o não adubado. Como mostra a Tabela 7, a partir dos 150 DAP (23 dias após a última aplicação de N), os tratamentos N_1 e N_2 , como grupo, diferem significativamente do tratamento N_0 . Num trabalho de avaliação similar, MACHADO *et alii* (1982), em experimento conduzido em Piracicaba, SP, com a mesma variedade, mostraram níveis de acumulação de matéria seca total da ordem de 5.390 g.m^{-2} solo, aos 500 DAP. Nesse experimento houve aplicação de 240 kg N.ha^{-1} aos 120 DAP e $280 \text{ kg K}_2\text{O.ha}^{-1}$ no plantio. Em outra avaliação, conduzida por SILVEIRA (1985) em Araras, SP, houve uma produção total de matéria seca de 3.490 g.m^{-2} , para um período de crescimento de 360 DAP, em resposta a uma dose elevada de aplicação de N (450 kg.ha^{-1}). Os presentes resultados são intermediários entre essas duas avaliações. No presente caso, a cultura foi colhida aos 405 DAP e o nível máximo de aplicação de N foi de 240 kg.ha^{-1} .

Uma extrapolação dos presentes dados, para o nível N_2 , em relação aos dados de MACHADO *et alii* (1982), in-

Tabela 7. Biomassa total (parte aérea) produzida em resposta a três níveis de aplicação de nitrogênio em função dos dias após plantio (DAP).

DAP	Biomassa seca (g.m^{-2} solo)		
	N ₀	N ₁	N ₂
90 (1)	100,6 a (2)	89,3 a	60,3 a
120	223,1 a	278,1 a	308,7 a
150	480,2 b	763,1 a	824,8 a
180	972,1 b	1430,9 a	1507,8 a
210	1755,6 b	2250,8 a	2233,7 a
240	2446,0 b	2862,4 a	2909,3 a
270	3049,9 b	3310,7 a	3380,2 a
300	3269,2 b	3522,3 a	3795,8 a
330	3413,7 b	3816,3 a	4068,8 a
360	3584,2 b	3950,1 a	4218,3 a
390	3613,5 b	4071,5 a	4230,2 a

(1) Avaliação feita antes da aplicação do N

(2) Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de $P \leq 0,05$.

dica que a variedade Na 56-79 poderia acumular (a partir dos 405 DAP) $11,0 \text{ g.MS.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, desde que existam condições propícias ao seu desenvolvimento vegetativo. Com um valor médio de 0,3 para a relação peso seco/peso fresco (STANFORD e AYRES, 1964), segue-se que o ritmo de acumulação de biomassa pode-se processar, sob condições favoráveis de manejo à taxa de $11,03 \text{ Tn.ha}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ (base peso fresco).

Com um índice de colheita (relação BC/BT) da ordem de 0,9, obtem-se $9,93 \text{ Tn.ha}^{-1}.\text{mês}^{-1}$, um valor muito próximo de $10 \text{ Tn.ha}^{-1}.\text{mês}^{-1}$, tido como indicador de bom nível para produção de colmos (CLEMENT, 1980; ALEXANDER, 1985).

Os dados de matéria seca total foram ajustados a um modelo logístico da forma:

$$Y = \frac{A}{1 + b.c \text{ DAP}} \quad (30)$$

onde A representa o valor máximo assintótico, e b e c são constantes de ajuste. A equação (28) descreve adequadamente os dados de acumulação de matéria seca (Tabela 7), na medida em que restringe, de forma hiperbólica a fase de crescimento exponencial (SHIH e GASCHO, 1980; HUNT, 1934; ALEXANDER, 1985). Equações logísticas similares foram apresentadas por MACHADO *et alii* (1982) e SILVEIRA (1985). Esses autores usaram uma aproximação não linear para a resolução da equação (30). No presente caso, usou-se uma aproximação linear que apresentou, em todos os casos, coeficientes de determinação (r^2) superiores a 0,96. A Figura 14 mostra as curvas de ajuste correspon

dentos. Desde que os tratamentos N_1 e N_2 não mostraram diferenças significativas (Tabela 7), uma única curva descreve a variação da biomassa em função do tempo, nesses tratamentos.

As equações de ajuste foram as seguintes:

$$B_T(N_0) = \frac{3613,5}{1 + 496,18 \cdot 0,9714 \text{DAP}} \quad (31)$$

$$B_T(N_1, N_2) = \frac{4150,84}{1 + 341,97 \cdot 0,9731 \text{DAP}} \quad (32)$$

Figura 14. Produção de biomassa seca total da parte aérea, em função dos dias após plantio, para plantas de cana tratadas com três níveis de nitrogênio.

4.2.2. Raízes

Inicialmente, foi planejado fazer avaliações periódicas do desenvolvimento do sistema radicular. Na prática, houve dificuldades técnicas. Foi feita uma comparação entre dados obtidos com um trado especialmente modificado (SCHUURMAN e GOEDEWAAGEN, 1965) e os obtidos pela escavação direta do solo (BÖHM, 1969). Os resultados obtidos pela tradagem se mostraram inconsistentes, devido principalmente à elevada resistência à penetração do solo. Mesmo a tensões de água abaixo de 10^{-1} MPa o solo possui elevada pegajosidade. Devido a seu elevado percentual de argila (Figura 8), houve dificuldades para a lavagem rápida do solo, impossibilitando portanto a obtenção de resultados realísticos.

Por essas razões, somente por ocasião da última colheita (390 DAP) foi feita uma avaliação do sistema radicular, pelo método de escavação em três parcelas representativas dos tratamentos impostos. Dados de peso seco, densidade radicular e uma estimativa de comprimento por unidade de superfície (usando-se o fator 150 m.g^{-1} peso seco, de NYE e TINKER, 1977) são mostrados na Tabela 8.

Os dados da Tabela 8, na medida que não repetidos, indicam apenas tendências. Também, a avaliação aos 390 DAP não é indicativa do estado funcional do sistema radicular, sendo mais apropriada à avaliação da biomassa radicular deixada pela cultura após colheita da parte aérea.

Tabela 8. Produção de raízes, sua densidade radicular, e o comprimento por unidade de superfície, nas camadas 0-0,2 e 0,2-0,4 m do solo. Dados relativos a 13 meses pós-plantio.

Profundidade (m)	Peso seco (g.6,6x10 ⁴ cm ³ solo)			Densidade radicular (mg.cm ⁻³ solo)			Comprimento radicular (cm.cm ⁻²)		
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂
0-0,2	119,8	177,4	98,8	1,82	2,68	1,50	544,5	806,3	448,2
0,2-0,4	30,4	32,6	36,5	0,46	0,49	0,55	128,3	148,1	166,1

Com essas ressalvas, podem ser feitas duas observações. Em primeiro lugar, observou-se que a máxima produção de raízes ocorre no tratamento N_1 . Isto sugere que o fator de controle poderia residir na quantidade de cobertura da parte aérea. Onde a densidade de plantas por unidade de superfície foi inicialmente baixa (Tabela 9) a produção de raízes também o foi (Tratamento N_0). Aumentando-se a competição entre colmos, aumenta a produção da biomassa (parte aérea) (Tabela 7). Contudo, uma elevação da densidade de colmos (Tabela 9) induz uma redução na produção do sistema radicular.

Tabela 9. Número de colmos por unidade de superfície em resposta à aplicação de três níveis de N.

DAP	N_0	N_1	N_2
	Nº de colmos.m ⁻²		
90	9,6 a	8,7 a	9,2 a
120	10,4 b	11,3 a	13,8 a
150	13,0 b	14,7 a	15,1 a
180	12,0 b	13,8 a	13,7 a
210	11,2 a	11,3 a	10,9 a
240	9,9 a	10,4 a	9,3 a
270	8,5 a	8,8 a	8,1 a
300	8,6 a	8,7 a	8,4 a
330	8,5 a	8,7 a	8,3 a
360	8,6 a	8,6 a	8,1 a
390	8,1 a	8,6 a	8,1 a

(1) Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de $P \leq 0,05$.

Não obstante isto, a quantidade de raízes produzidas pelo tratamento N_2 foi suficiente para sustentar a maior produção de biomassa da parte aérea nesse tratamento, e a correspondente maior extração de N mineral do solo. Em segundo lugar, considerando-se a densidade radicular, observou-se que a maior concentração de raízes na camada 0-0,2m foi a correspondente ao tratamento N_1 ($2,68 \text{ mg.cm}^{-3}$) enquanto que a menor correspondeu ao tratamento N_2 ($1,5 \text{ mg.cm}^{-3}$, Tabela 8). Na camada 0,2-0,4 m há uma tendência de aumento conforme se eleva o nível de N aplicado ao solo ($0,46$ vs. $0,55 \text{ mg.cm}^{-3}$ para os tratamentos N_0 e N_2 respectivamente). Essa maior densidade radicular no tratamento N_2 poderia ser explicada pela conjunção de dois fatores: maior quantidade de N - mineral ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) lixiviado para esta camada durante a estação de crescimento e maior umidade disponível por maior sombreamento da parte aérea, reduzindo portanto as perdas evaporativas de água no solo e estimulando o enraizamento (NYE e TINKER, 1977; GASCHO e SHIH, 1983).

Uma extrapolação dos valores de densidade radicular indicados na Tabela 8 para kg.ha^{-1} mostra que os tratamentos empregados podem acumular um total de 4552 (N_0); 6313 (N_1) e 4102 (N_2) kg.ha^{-1} de biomassa seca de raízes respectivamente. A avaliação realizada indicou que aos 390 DAP as relações parte aérea : raiz foram da ordem de 7,94 (tratamento N_0); 6,39 (N_1) e 10,3 (N_2). Portanto, a aplicação de uma dose elevada de N pareceu favorecer em maior grau o desenvolvimento da parte aérea.

4.2.3. Número e altura de colmos

Nas Tabelas 9 e 10 são mostradas as variações estacionais do número de colmos e sua altura média durante o período experimental.

Tabela 10. Altura média de colmos em resposta à aplicação de três níveis de N.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	cm		
90	26,2 a(1)	21,9 a	31,3 a
120	39,0 a	52,8 a	49,5 a
150	70,6 a	69,2 a	84,1 a
180	124,3 a	125,1 a	123,3 a
210	163,7 b	169,4 b	180,2 a
240	187,6 a	191,8 a	202,1 a
270	209,5 a	224,4 a	229,4 a
300	224,2 a	242,7 a	248,5 a
330	239,5 a	252,3 a	266,8 a
360	241,6 a	254,4 a	261,9 a
390	249,3 a	260,3 a	269,4 a

(1) Médias seguidas de letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de $P \leq 0,05$.

Com relação ao número de colmos por unidade de área, observou-se um rápido aumento na produção de perfilhos

nos tratamentos que levaram N em relação as parcelas testemunha. Entretanto, não houve diferença significativa entre os níveis de 120 e 240 kg N.ha⁻¹ (Tabela 9). A produção de colmos secundários atingiu um máximo aos 150 DAP, com 13,0 (N₀); 14,7 (N₁) e 15,1 (N₂) colmos.m⁻² respectivamente. Após essa data, há uma progressiva queda no número de colmos, sendo que maior o nível de N aplicado, maior a mortalidade de perfilhos. Aos 210 DAP, a população de colmos estabilizou-se em valores médios de 8,1-6,6 colmos.m⁻², não existindo diferenças significativas entre tratamentos (Tabela 9). A população observada por ocasião da última colheita (390 DAP) mostrou reduções de 38, 41 e 46%, com relação aos valores máximos (150 DAP) para os tratamentos N₀, N₁ e N₂, respectivamente.

MACHADO et alii (1982) observaram que a cultivar NA 56-79 apresentou um rápido aumento no número de colmos.m⁻² até aproximadamente 125 DAP, seguido de um acentuado declínio, estabilizando-se por volta de 250 DAP, com aproximadamente 9,0 colmos.m⁻², havendo uma redução natural de aproximadamente 50% na população de colmos. Esses autores observaram que tal padrão de perfilhamento parece característico de diversas variedades de cana-de-açúcar. Padrões de perfilhamento similares são mostrados por ASANA (1950); YOON (1971), NICKELL (1975); BULL e GLASZIOU (1975); SHIH e GASCHO (1980), GASCHO e SHIH (1983) e ALEXANDER (1985). Em contraposição, ORLANDO Fº et alii (1977), trabalhando com um Latossolo Vermelho-escuro orto, não observaram efeitos significativos do N aplicado (0-120 kg N.ha⁻¹) sobre o perfilhamento e a produti-

vidade final da cultivar NA 56-79. Esses autores interpretaram a falta de resposta à adubação nitrogenada como um "reforço da hipótese de fixação biológica de N pelo sistema radicular".

A adubação nitrogenada não afetou significativamente a altura do colmo, exceção feita aos 210 DAP (Tabela 10). Deve ser mencionado, entretanto, que no tratamento N_2 observaram-se elongações de colmo em canas isoladas bem superiores à média obtida, especialmente após os 270 DAP. Em algumas parcelas houve acamamento desses colmos. Isto originou uma brotação adicional, devido a abertura do dossel vegetativo, associada ao declínio da área foliar por colmo (Tabela 11). Essa brotação adicional não foi computada na Tabela 9, embora esteja incluída na estimativa da biomassa total (Tabela 7). Um excesso de adubação nitrogenada pode ter efeitos prejudiciais à qualidade do caldo extraível justamente porque induz um excesso de crescimento vegetativo. Os brotos desenvolvidos tardiamente, operam como "drenos" metabólicos dos colmos primários ou secundários, decrescendo portanto a quantidade de sacarose aparente na fração de colmos aptos para o processamento industrial (CLEMENT, 1980). SILVEIRA (1985) também demonstrou o mesmo efeito: uma dose de 450 kg N.ha^{-1} aumentou o número de brotos por parcela, em comparação com a testemunha. Entretanto, ao final do seu período experimental (360 DAP), o número de colmos adultos por parcela foi quase igual em ambos os níveis de aplicação de N.

Tabela 11. Área foliar total por colmo (ATF) e índice de área foliar (IAF) em resposta à aplicação de três níveis de N.

DAP	ATF ($\text{cm}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$)			IAF ($\text{m}^2 \text{ folha} \cdot \text{m}^{-2} \text{ solo}$)		
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂
90	677 a	598 a	446 c	0,65 a	0,52 a	0,41 b
120	1038 a	1150 a	942 a	1,08 a	1,30 a	1,30 a
150	1292 a	1176 a	1868 b	1,68 b	2,61 a	2,82 a
180	2483 a	2543 a	2701 b	2,98 b	3,51 a	3,70 a
210	3312 a	3761 b	4615 c	3,71 c	4,25 b	5,03 a
240	4131 a	4481 b	5215 c	4,09 b	4,66 a	4,85 a
270	4553 a	4557 a	5346 b	3,87 a	4,01 a	3,73 a
300	4209 a	3989 a	4484 b	3,62 a	3,47 a	3,55 a
330	4059 a	4322 b	4542 c	3,45 a	3,76 b	3,77 b
360	3756 a	4081 b	4519 c	3,23 a	3,51 b	3,66 b
390	3679 a	3733 a	4531 b	2,98 a	3,21 a	3,67 b

(1) Média seguidas de letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de

$P \leq 0,05$.

4.2.4. Desenvolvimento do dossel vegetativo:

Área foliar total por colmo e índice de área foliar

Os dados relativos a área foliar total por colmo (AFT) e índice de área foliar (IAF) são mostrados na Tabela 11.

Como mencionado previamente (item 3.2.6), o índice de área foliar (IAF) da cultura foi estimado pelo produto do número de colmos. m^{-2} (Tabela 8) e a área foliar total por colmo (AFT, Tabela 11). Como já discutido, a aplicação de N não produziu uma mudança significativa na população de plantas após os 180 DAP. Portanto, variações em IAF após esse período são diretamente decorrentes do efeito do N sobre a taxa de expansão foliar. A Tabela 11 indica que, em geral, a aplicação de N aumentou significativamente a AFT ($\text{cm}^2 \cdot \text{planta}^{-1}$). Esse resultado é interessante se comparado ao mostrado na Tabela 10: a aplicação de N parece favorecer em maior grau a expansão foliar do que o crescimento linear do colmo. Isto fica evidenciado na Tabela 12, onde se mostra a relação entre AFT e altura de colmo.

Observa-se que após os 150 DAP o tratamento que levou maior nível de N mostrou maior relação entre a área foliar e a altura do colmo. Os valores máximos ocorrem no período 210-270 DAP, o que indica que além de influenciar positivamente na taxa de expansão foliar, a aplicação de N causou uma maior duração da ATF por colmo.

Tabela 12. Relação entre a área foliar total por colmo e a altura do mesmo, para três níveis de aplicação de N.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	cm ² AF.cm ⁻¹ colmo		
90	25,8	27,3	14,3
120	26,6	21,7	19,0
150	18,3	17,0	22,2
180	20,0	20,3	21,9
210	20,2	22,2	25,6
240	22,0	23,4	25,8
270	21,7	20,3	23,3
300	18,8	16,4	18,0
330	16,9	17,1	17,0
360	15,5	16,0	17,3
390	14,8	14,3	16,8

Do ponto de vista da relação entre o crescimento e a produtividade, um dos componentes mais importantes é o IAF (BULL e GLASZIOU, 1975; IRVINE, 1975; MACHADO et alii, 1982; GASCHO e SHIH, 1983; ROSSIELLO et alii, 1983; CLEMENT, 1980; ALEXANDER, 1985).

Como mostra a Tabela 11, independentemente de tratamentos, o IAF aumentou rapidamente até os 210-240 DAP, a partir do qual começa um declínio rápido e contínuo. Ao final do período experimental, a redução do IAF com respeito ao

valor máximo foi similar para todos os tratamentos (N_0 , 27%, N_1 , 31% e N_2 , 27%). As reduções em IAF refletem tanto a redução do número de colmos. m^{-2} , induzida pelo efeito do autosombreamento foliar imposto com a expansão do IAF (GASCHO e SHIH, 1983; MACHADO et alii, 1982, Tabela 9), como a redução em AFT por colmo (Tabela 11). Essa redução reflete o fato de que a taxa de senescência foliar superou a taxa de expansão de novas folhas, especialmente a partir de 300-360 DAP, quando o deficit hídrico imposto à cultura afetou a taxa de produção de novo material foliar.

A expansão foliar é o processo fisiológico mais sensível ao estresse hídrico (ROSSIELLO et alii, 1981). Os máximos valores de IAF observados associam-se ao tratamento N_2 , que começa a diferir significativamente da testemunha (N_0) a partir dos 150 DAP (isto é, quase 30 dias após a aplicação da segunda parcela de N). Ao final do período experimental, os tratamentos N_0 e N_1 não diferiram significativamente (2,98 vs. 3,21) enquanto havia um índice superior (3,62) para o tratamento N_2 .

Um padrão muito similar de variação do IAF, foi descrito por SILVEIRA (1985), trabalhando com a mesma variedade do presente trabalho. Padrões similares com outras variedades foram observados por GOSNELL (1971) e IRVINE e MATHERTE (1978), citados por GASCHO e SHIH (1983).

4.2.5. Distribuição da biomassa total da parte aérea

Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os valores de biomassa de folhas (B_F) e de colmos (B_C), assim como as correspondentes relações de partição B_F/B_T e B_C/B_T .

Com relação à produção de B_F , observa-se que a mesma atinge um valor máximo aos 240 DAP, da ordem de 416 e 473 g.m^{-2} para os tratamentos N_0 e N_1 . O pico de acumulação para o tratamento N_2 (512 g.m^{-2}) ocorreu aos 210 DAP.

Após essa data, observa-se um decréscimo de acumulação de massa foliar para os três tratamentos. O percentual de redução em B_F , ao final do período, em relação aos valores máximos observados para cada tratamento foram de 27,4 (N_0); 31,1 (N_1) e 27,2 (N_2) respectivamente. Os valores obtidos para o tratamento N_0 foram consistentemente menores que os correspondentes aos tratamentos adubados, exceção feita aos 270 e 300 DAP (Tabela 13). Dentro dos tratamentos adubados, o tratamento N_2 tendeu a acumular mais B_F do que o N_1 , embora essa superioridade atinja significação estatística definida ao final do período experimental (Tabela 13).

Na mesma Tabela 13, encontram-se indicados os coeficientes de distribuição B_F/B_T correspondentes aos tratamentos aplicados. Com a exceção dos 180 DAP, onde o tratamento N_0 mostrou diferença estatística significativa em relação aos tratamentos adubados (0,31 vs. 0,25), em todas as outras épocas o nível de adubação nitrogenada pareceu não inter

Tabela 13. Variação da biomassa de folhas de cana, em resposta à aplicação de três níveis de nitrogênio, em função dos dias após plantio.

DAP	B_F ($g \cdot m^{-2}$)			B_F/B_T ($g \cdot g^{-1}$)		
	N_0	N_1	N_2	N_0	N_1	N_2
90	63,4 a(1)	48,7 b	38,6 b	0,63 a	0,56 b	0,64 a
120	106,9 a	129,8 a	130,0 a	0,48 a	0,47 a	0,42 a
150	169,2 c	264,0 b	285,4 a	0,35 a	0,35 a	0,35 a
180	301,9 c	356,3 b	375,5 a	0,31 a	0,25 b	0,25 b
210	376,7 c	431,9 b	511,5 a	0,21 a	0,22 a	0,22 a
240	415,7 b	473,0 a	493,1 a	0,17 a	0,17 a	0,17 a
270	392,6 a	407,2 a	378,6 a	0,13 a	0,12 a	0,11 a
300	367,3 a	352,2 a	360,6 a	0,11 a	0,10 a	0,09 a
330	349,3 b	381,6 a	382,5 a	0,10 a	0,10 a	0,09 a
360	327,2 b	355,5 a	371,2 a	0,09 a	0,09 a	0,09 a
390	301,7 a	325,7 b	372,3 a	0,08 a	0,08 a	0,09 a

(1) Médias seguidas de letras iguais, dentro de época (DAP) não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

Tabela 14. Variação da biomassa de colmos de cana, em resposta à aplicação de três níveis de nitrogênio, em função dos dias após plantio.

DAP	B _C (g.m ⁻²)			B _C /B _T (g.g ⁻¹)		
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂
90	33,1 a(1)	35,7 a	30,7 a	0,37 a	0,44 b	0,36 a
120	115,4 b	137,7 b	178,7 a	0,52 a	0,53 a	0,58 b
150	319,9 b	311,3 b	539,4 a	0,65 a	0,65 a	0,65 a
180	681,4 b	714,4 b	1123,4 a	0,69 a	0,75 b	0,75 b
210	1327,8 b	1306,1 b	1677,5 a	0,79 a	0,78 a	0,78 a
240	2044,1 b	2044,3 b	2248,9 a	0,83 a	0,83 a	0,83 a
270	2627,7 c	2733,9 b	3001,6 a	0,87 a	0,88 a	0,89 a
300	2971,6 c	3527,3 b	3461,7 a	0,89 a	0,90 a	0,91 a
330	3143,9 c	3488,8 b	3718,9 a	0,90 a	0,90 a	0,91 a
360	3234,4 c	3620,2 b	3880,9 a	0,91 a	0,91 a	0,91 a
390	3290,1 c	3749,9 b	3938,3 a	0,92 a	0,92 a	0,91 a

(1) Médias seguidas de letras iguais, dentro de época (DAP) não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

ferir no valor do coeficiente de partição B_F/B_T . Os valores observados aos 90 DAP são outra exceção, mas eles constituem uma avaliação inicial da biomassa, prévia à aplicação de N.

Na Tabela 14 estão contidos os dados relativos à acumulação de biomassa no colmo (B_C) e as correspondentes relações B_C/B_T para os três tratamentos estudados. Há uma progressão de tipo logístico no ritmo de acumulação de B_C nos três tratamentos. Os valores máximos ocorrem por ocasião da última colheita, com registros finais de 3290; 3750 e 3938 $g.m^{-2}$, para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 respectivamente. Observa-se que até os 240 DAP não existem diferenças significativas entre os tratamentos N_0 e N_1 . A partir dessa data eles diferem sistematicamente, sendo que o tratamento N_1 foi sempre superior à testemunha (Tabela 14), até o final do período experimental. Com relação ao tratamento N_2 , excetuando-se os 90 DAP, mostrou níveis significativamente superiores de acumulação de B_C , em todas as épocas, em relação aos outros tratamentos (Tabela 14).

Com relação à partição da biomassa seca entre o colmo e o total da parte aérea (B_C/B_T) observou-se um padrão similar ao já mencionado em relação ao coeficiente B_F/B_C . Excetuando-se o período 90-180 DAP, onde existem ligeiras diferenças (Tabela 14), nas demais épocas de colheita, onde se processam os maiores níveis de acumulação de matéria seca (Tabela 7, 13 e 14), não existem diferenças significativas entre tratamentos. Portanto, os resultados da Tabela 14 permitem

inferir que a adubação nitrogenada *per se* não modifica o ritmo de acumulação de fotossintatos depositados nos colmos, ou seja que a velocidade de translocação da folha para o colmo parece não resultar afetada.

Este resultado é oposto ao obtido por INGRAM (1983), que observou que uma alta dose de adubação nitrogenada (575 kg N.ha^{-1}) associada a alta frequência de irrigação, produziu uma relação de partição de matéria seca entre o colmo e a parte aérea inferior à obtida com um baixo nível de aplicação de N (225 kg N.ha^{-1}) e irrigação aplicada em baixa frequência (0,85 vs. 0,91 respectivamente para o período 130-250 DAP). Relações de partição B_C/B_T similares às observadas no presente trabalho, foram comunicadas por ASANA (1960), YADAY e SHARMA (1983) e MACHADO *et alii* (1982). Estes últimos autores observaram que até os 100 DAP a relação B_F/B_T , na variedade NA 56-79, foi superior a 0,7, e que ao redor dos 400 DAP, a mesma caiu para 0,09; resultados, portanto, bem próximos dos mostrados na Tabela 13.

Na Tabela 15 é mostrado o nível de variabilidade amostral (C.V., %) associada aos três tratamentos, para B_T , B_F e B_C . Como mencionado previamente (item 2.2.1) a consideração da variabilidade experimental é de particular interesse na cultura de cana-de-açúcar, no intuito de interpretar resultados de adubação nitrogenada.

Observa-se na Tabela 15 que para as três variáveis amostradas (B_T , B_F e B_C), houve uma redução progressiva do C.V., em função do avanço da estação de crescimento, independente do nível de aplicação de N.

Tabela 15. Coeficientes de variação amostral (C.V. %) para a biomassa total (B_T), de folhas (B_F) e colmos (B_C), em resposta à aplicação de três níveis de nitrogênio, em função dos dias após plantio.

DAP	B_T ($g.m^{-2}$)			B_F ($g.m^{-2}$)			B_C ($g.m^{-2}$)		
	N_0	N_1	N_2	N_0	N_1	N_2	N_0	N_1	N_2
	C.V. (%)			C.V. (%)			C.V. (%)		
90	52,4	35,0	39,8	52,3	38,6	37,0	53,6	43,6	30,7
120	28,1	26,7	29,0	27,6	30,7	23,4	30,4	24,3	33,2
150	25,3	23,3	24,1	27,1	31,4	30,8	23,6	12,6	15,2
180	17,6	19,9	18,0	17,1	22,7	24,6	17,3	15,1	8,8
210	21,0	16,2	16,1	25,6	20,7	19,5	15,4	12,0	12,5
240	15,0	11,1	12,0	16,7	14,9	17,4	13,3	7,0	6,0
270	11,8	12,6	10,0	12,2	18,4	14,1	11,3	6,8	7,7
300	8,4	8,9	9,5	9,8	8,1	12,4	7,0	9,0	6,3
330	7,3	10,0	12,7	9,7	12,5	20,6	5,6	7,3	6,1
360	11,9	8,1	7,1	14,9	8,8	7,7	8,6	7,5	4,9
390	9,3	6,5	8,3	12,8	10,0	9,3	6,0	2,2	6,5

Durante os primeiros 60 dias (90-150 DAP) os CV obtidos, para quatro repetições por tratamento, oscilaram entre 23 e 52% para as três variáveis. Esse período coincide com o de máxima produção de perfilhos e progressivo desenvolvimento da cobertura foliar (Tabelas 9, 10 e 11). Após o período 150-180 DAP, onde foi estimado acontecer o fechamento do dossel vegetativo (item 4.3), observou-se que com poucas exceções, os CV associados a B_F resultaram superiores aos correspondentes a B_C . Os CV para B_T resultaram intermediários. O tratamento N_2 fechou o dossel vegetativo em menor tempo que os outros tratamentos, em virtude de uma maior taxa de expansão foliar e maior número de perfilhos (Tabelas 9 e 11), e mostra, de forma geral menor variabilidade amostral para B_C . Esse padrão de variabilidade, ditado pelo hábito de crescimento da cultura, pode explicar em parte o fato de não existir diferença estatística demonstrável (ao nível de $P \leq 0,05$) entre os tratamentos N_1 e N_2 com relação a B_T (Tabela 7), enquanto que são observadas diferenças consistentes em B_C entre os mesmos (Tabela 14).

4.3. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E INTERCEPTAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

WARREN WILSON (1981) propôs um modelo para a TCC, inteiramente dependente da radiação solar (nenhum outro fator ambiental sendo limitante), no qual ela fica expressa

pela interação de três fatores: a densidade de fluxo da radiação solar fotossinteticamente ativa incidente (RFA, 400-700 nm), a sua eficiência de interceptação e sua eficiência de utilização, segundo a expressão:

$$TCC = RFA \times [1 - \exp(-K.IAF)] \times \epsilon \quad (33)$$

onde RFA é a radiação solar ativa para fotossíntese, ϵ a eficiência de utilização de RFA e o termo entre colchetes é a eficiência de interceptação. A relação fracional entre a RFA absorvida e a incidente é mostrada, como função do IAF na Figura 12. Com relação à eficiência de utilização (ou eficiência fotossintética, ϵ), MACHADO (1981) observou que seu valor médio durante o ciclo cultural de NA 56-79 foi de 2,8%, sendo que desde o plantio até os 220 DAP o valor foi de 1,1, e posteriormente aumentou para 4%. Embora possuindo um metabolismo tipo C_4 , a cana-de-açúcar não possui eficiências superiores às de outras espécies com o mesmo sistema de fixação fotossintética de CO_2 (BULL e GLASZIOU, 1975). Ainda, plantas C_3 , de elevada eficiência fotossintética, mostram TCC comparáveis, porém durante curtos períodos de tempo (IRVINE, 1967; BULL e GLASZIOU, 1975). Aparentemente a alta produção de biomassa em cana, liga-se a sua capacidade de manter altos valores médios de TCC por períodos prolongados de tempo (IRVINE, 1975; BULL e GLASZIOU, 1975; MACHADO, 1982; SILVEIRA, 1985). Eficiências fotossintéticas da mesma ordem que as obtidas por MACHADO (1981) foram citadas por GASCHO e SHIH (1983), porém inferiores às registradas por BURR et

alii (1957). Existe, evidentemente, variação genotípica para ϵ (IRVINE, 1977), porém os limites genéticos parecem estreitos para explicar diferenças em TCC.

MACHADO (1981) observou que ϵ aumentou até 300 DAP, sendo que posteriormente declinou de forma contínua. Declínios similares são conhecidos em outras espécies (IRVINE, 1975; CHARLES-EDWARDS, 1982) e possivelmente refletem o efeito combinado do auto-sombreamento do dossel vegetativo com o aumento da resistência estômática associada à idade da folha (BULL e GLASZIOU, 1975).

No presente trabalho, o efeito do N sobre a interceptação de radiação solar global (R_g) ou RFA foi estimado pelas equações mostradas na Figura 12.

As estimativas de RFA foram feitas com a hipótese de que ela representa 45% da R_g (BLAD, 1983; FISHER, 1984), um valor próximo dos 46 e 46,7% estimados por MACHADO **et alii** (1985) e ROSSIELLO **et alii** (1983) respectivamente. Essas estimativas constam na Tabela 16.

Como pode se observar, entre 90-120 DAP processa-se um rápido aumento da capacidade absorptiva do dossel vegetativo para RFA ou R_g , independentemente de tratamentos. A RFA é de maior significação em termos de crescimento vegetal, tal como mostra a equação (33). A interceptação de RFA é uma função do IAF, tal como expressam as equações (29), (33) e Figura 12. Portanto, mais rápida a expansão do IAF, mais eficiente uma variedade na absorção de RFA.

Tabela 16. Interceptação da radiação solar global (Rg) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA), pelo dossel vegetativo de cana-planta em função de três níveis de aplicação de N e dos dias após plantio.

DAP	N ₀		N ₁		N ₂	
	Rg	RFA	Rg	RFA	Rg	RFA
% da radiação incidente						
90	35,1	45,1	29,3	38,9	24,8	31,7
120	51,4	63,5	58,1	70,3	58,9	70,5
150	68,3	79,0	83,5	91,0	85,8	93,8
180	86,0	93,6	90,1	96,3	92,1	97,2
210	92,2	97,4	94,2	98,7	97,3	99,4

Como já discutido, a adição de N promoveu uma maior expansão do IAF nos tratamentos adubados. O tratamento N₂, possuindo maiores taxas de expansão foliar durante o período 90-120 DAP (Tabelas 11 e 12), mostra de forma mais precoce uma maior área absorptiva de RFA. Como mostra a Tabela 16, aos 150 DAP, no tratamento N₂ houve uma absorção de 93,8% da RFA incidente seguido pelo tratamento N₁ (91,0), superando a testemunha em 14,8%. Vários autores têm considerado que para efeitos práticos, o dossel vegetativo pode ser considerado fechado quando intercepta entre 90-95% da RFA incidente (MONTEITH, 1969; GASCHO e SHIH, 1983; ALEXANDER, 1985).

De fato, adotando-se o modelo mostrado na Figura 12, não existe fechamento total do dossel pela natureza assintótica da função descritiva (equação (27)). ALEXANDER (1985) comentou que do ponto de vista prático nunca o dossel fecha totalmente, deixando frestas, espacialmente distribuídas, dependentes da arquitetura foliar. A variedade usada no presente trabalho apresenta folhas erectas e relativamente estreitas, e portanto facilita a penetração da radiação incidente, mesmo a altos valores de IAF.

4.4. TAXAS DE CRESCIMENTO

4.4.1. Parte aérea (B_T)

Na Figura 15(a,b) são mostradas as variações sazonais da taxa de crescimento da cultura (TCC) para os tratamentos considerados. Como não houve diferença significativa para B_T entre os tratamentos N_1 e N_2 (Tabela 7 e Figura 14), foram geradas somente duas séries de valores de TCC. Nessa Figura, a TCC é apresentada em duas formas: como valor médio entre dois períodos amostrais sucessivos (o que origina o histograma distribuído em forma de sino) ou como função do tempo (a linha senoidal contínua). A primeira representação corresponde à forma clássica de análise (EVANS, 1972; HUNT, 1978), enquanto a segunda é a dita forma "funcional" de análise (HUNT, 1978). Tal como indica a equação (13), ela re-

presenta a derivada primeira das equações de ajuste de B_T a DAP (equações 29 e 30), e é descrita numericamente pelas equações seguintes:

$$TCC_{N_0} = \frac{52025,7 \cdot 0,9714^{DAP}}{(1 + 496,18 \cdot 0,9714^{DAP})^2} \quad (34)$$

$$TCC_{N_{1-2}} = \frac{38706,4 \cdot 0,9731^{DAP}}{(1 + 341,97 \cdot 0,9731^{DAP})^2} \quad (35)$$

Como mostra a Figura 15 houve picos instantâneos máximos aos 210 DAP, de 26,13 e 28,21 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para os tratamentos N_0 e $N_{1,2}$ respectivamente. Após esse período há um rápido declínio da TCC. Quando se consideram os valores médios de TCC por período amostral, observa-se um valor médio, máximo de 25,17 e 27,31 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para os tratamentos N_0 e $N_{1,2}$ respectivamente, o qual ocorre no período de 210-240 DAP (Figura 15). Considerando-se um valor médio de TCC para todo o período de estudo (90-390 DAP) obtém-se os valores de 11,6 e 13,3 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para N_0 e $N_{1,2}$ respectivamente. Esses valores são comparáveis com os disponíveis na literatura. BULL e GLASZIOU (1975) indicaram que de forma geral as TCC para cana-de-açúcar situam-se na faixa de 20-30 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

BORDEN (1942, citado por HUMBERT, 1974) encontrou taxas médias de 22 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, e INGRAM (1983) de 31,3 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o período 130-250 DAP. No país, MACHADO et alii (1982) encontraram, na variedade NA 56-79, um valor

Figura 15. Variação estacional da taxa de crescimento da cultura (TCC) de cana-de-açúcar em resposta à aplicação de N. a) 0 kg N.ha⁻¹; b) 120-240 kg N.ha⁻¹.

máximo de $25 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ aos 300 DAP (cana de 18 meses, 240 kg N.ha^{-1}), e uma $\overline{\text{TCC}}$ de $12 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. SILVEIRA (1985) observou valores de TCC máximos da ordem de 18,87 e 21,0 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, aos 180 DAP, para aplicações de 0 e 450 kg N.ha^{-1} respectivamente. Como mencionado previamente (item 2.1) haverá necessidade de pesquisas que detalhem os níveis de aplicação de N na faixa de 200-400 kg N.ha^{-1} para determinar se elevadas aplicações de N deprimem efetivamente a TCC, como sugere a comparação de dados aqui apresentados.

4.4.2. Colmo (B_C)

De forma similar à determinação da TCC com base em biomassa total (B_T), foi obtida a TCC com base na biomassa do colmo.

Previamente foram obtidas as funções de ajuste entre B_C e DAP. Como houve diferenças significativas entre tratamentos (Tabela 14), três equações diferentes foram calculadas:

$$B_{CN_0} = \frac{3290,1}{1 + 1162,04 \cdot 0,9694\text{DAP}} \quad (36)$$

$$B_{CN_1} = \frac{3749,9}{1 + 907,83 \cdot 0,9717\text{DAP}} \quad (37)$$

$$B_{CN_2} = \frac{3938,3}{1 + 900,55 \cdot 0,9704\text{DAP}} \quad (38)$$

Os valores previstos por essas expressões são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17. Acumulação de matéria seca em colmos de cana, estimada através da função logística de ajuste, para três níveis de aplicação de N em função de DAP.

DAP	N_0	N_1	N_2
	$g.m^{-2}$		
90	45,8	54,2	64,3
120	113,9	125,9	154,6
150	274,6	285,2	360,2
180	618,1	612,1	782,5
210	1217,8	1185,5	1493,2
240	1970,4	1960,4	2365,6
270	2603,6	2707,1	2101,2
300	2980,8	3225,6	3549,3
330	3161,0	3509,2	2770,5
360	3238,0	3644,4	3868,4
390	3269,0	3704,6	3909,6

Uma comparação entre os dados da Tabela 17 e os constantes na Tabela 14 indica o bom ajuste obtido com aplicação das equações (36-38). Os coeficientes de determinação (r^2) das transformações lineares dessas equações foram 0,998; 0,994 e 0,982 para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 respectivamente.

As derivadas primeiras das equações (36), (37) e (38) em relação ao tempo indicam as correspondentes taxas de crescimento do colmo e valem:

$$TCColmo_{N_0} = \frac{119918,11 \cdot 0,9694^{DAP}}{(1 + 1162,04 \cdot 0,9694^{DAP})^2} \quad (39)$$

$$TCColmo_{N_1} = \frac{97729,76 \cdot 0,9717^{DAP}}{(1 + 907,83 \cdot 0,9717^{DAP})^2} \quad (40)$$

$$TCColmo_{N_2} = \frac{106565,30 \cdot 0,9704^{DAP}}{(1 + 900,55 \cdot 0,9704^{DAP})^2} \quad (41)$$

Os valores obtidos entre 90 e 390 DAP encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18. Taxas de crescimento do colmo em cana-de-açúcar em resposta à aplicação de N, em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	g.m ⁻² .dia ⁻¹		
90	1,40	1,53	1,90
120	3,42	3,47	4,46
150	7,82	7,52	9,83
180	15,60	14,61	18,84
210	23,83	23,18	27,84
240	24,55	26,87	28,40
270	16,85	21,74	19,84
300	8,70	13,12	10,54
330	3,87	6,56	4,83
360	1,59	2,99	2,06
390	0,63	1,31	0,86

De forma geral o padrão de variação da TCColmo foi similar ao mostrado pela TCC (Figura 15), porém existem alguns pontos de diferença. Os picos máximos instantâneos para TCColmo ocorrem aos 240 DAP. Os valores máximos observados foram de 24,6; 26,9 e 28,4 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 . Esses valores superam os correspondentes valores da TCC nessa data, que foram de 22,8 (N_0) e 25,0 (média N_1-N_2) $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ respectivamente. Então, a partir dos 240 DAP, a adição de N promoveu em maior grau da acumulação de matéria seca de colmos do que o da matéria seca total. A TCC encontra-se, a partir dos 240 DAP, adversamente afetada, em grau diverso, nos três tratamentos, como consequência de taxas de crescimento foliar negativas a partir dessa data, como pode ser inferido a partir da Tabela 13.

Inicialmente, o tratamento N_2 mostrou valores maiores de TCColmo em relação aos outros tratamentos, até atingir um máximo aos 240 DAP (Tabela 18). Nessa data as relações TCColmo/TCC foram de 1,08; 1,07 e 1,14 para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 respectivamente. Posteriormente foi observado que essa relação declinou nos tratamentos N_0 e N_2 , enquanto que aumentou no N_1 , de tal forma que ao final do período experimental a mesma teve os seguintes valores: 0,98; 1,42 e 0,93 para N_0 , N_1 e N_2 .

Valores de TCColmo similares aos calculados para o tratamento N_2 foram obtidos por INGRAM (1983), porém a um nível muito superior de aplicação de N (575 kg.ha^{-1}). Considerando-se o total do ciclo, os valores de TCColmo foram

de 12,8; 12,17 e 10,74 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 . O fato de que a partir dos 240 DAP a TCColmo foi superior à TCC permite sugerir a hipótese de que, em adição as fontes de C e N orgânicas translocadas ao colmo a partir da área foliar funcional, a massa foliar senescente poderia estar contribuindo à aceleração da TCColmo.

SILVEIRA (1985) encontrou uma elevação brusca do teor de N- NH_2 solúvel em folhas de NA 56-79, após os 300 DAP, sugestiva de um aumento na atividade de proteases foliares. A translocação de compostos orgânicos é, como processo fisiológico, relativamente insensível ao estresse hídrico, e sua magnitude está determinada pela quantidade disponível de substrato orgânico passível de remobilização (LEGG, 1981). É possível então, que mesmo após os 300 DAP, uma fração de fotossintatos acumulados em folhas senescentes tenha contribuído para sustentar relações TCColmo/TCC superiores a 1,0 no presente caso.

4.5. TAXA DE CRESCIMENTO RELATIVO

A taxa de crescimento relativo da cultura representa a taxa de variação da biomassa seca em relação ao tempo por unidade de peso seco previamente acumulado, ou de outra forma, a relação entre TCC e B_T , tal como indica a equação 18.

De forma similar ao mencionado em relação a TCC, devido à inexistência de diferença estatística em B_T para os níveis N_1 e N_2 , somente duas séries de valores de TCR são mostradas na Figura 16: os correspondentes ao nível N_0 (Figura 16a) e os correspondentes à média entre N_1 e N_2 (Figura 16b). Também de forma similar à Figura 15, os valores de TCR foram expressos em forma de valores médios ($\overline{TCR}$) por período amostral ou como função contínua do tempo (DAP). A primeira forma de expressão implica em tomar a diferença entre os logaritmos naturais dos valores sucessivos de B_T , divididos pela duração do período amostral (no caso 30 dias) (EVANS, 1972). A segunda aproximação implica na relação entre a TCC e os correspondentes valores de B_T , o que gera as curvas contínuas (Figura 16), representativas das seguintes equações:

$$TCR_{N_0} = \frac{14,40 \cdot 0,9714^{DAP}}{(1 + 496,18 \cdot 0,9714^{DAP})} \quad (42)$$

$$TCR_{N_1, N_2} = \frac{9,325 \cdot 0,9731^{DAP}}{(1 + 341,70 \cdot 0,9731^{DAP})} \quad (43)$$

O padrão de variação das curvas é similar: há um suave declínio entre 90-180 DAP, uma queda quase linear até os 270 DAP, e uma lenta desaceleração final, com as taxas tendendo a zero ao final do período de crescimento (300-390 DAP). Não existem grandes diferenças entre os valores de TCR para os tratamentos com e sem nitrogênio. As maiores

Figura 16. Variação estacional da taxa de crescimento relativo (TCR) de uma cultura de cana-de-açúcar em resposta à aplicação de N. a) 0 kg N.ha⁻¹; b) 120-240 kg N.ha⁻¹.

diferenças ocorrem no período 90-210 DAP, como indica a Tabela 19. Nesse período, não houve grandes diferenças entre os tratamentos N_0 e a média dos tratamentos N_1-N_2 na relação AFT/altura de colmos (Tabela 12), embora nessa fase, os tratamentos que receberam N estivessem expandindo área foliar a taxas superiores (Tabela 11). As diferenças mais acentuadas nesse período correspondem ao número de colmos por unidade de superfície (Tabela 9). O tratamento N_0 , possuindo menor densidade de colmos, mostrou um dossel mais aberto que consequentemente interceptou menor radiação solar por unidade de superfície (Tabela 16), em decorrência de menor IAF. Por outro lado, isso pode permitir menor auto-sombreamento para cada colmo individual, o que explicaria a ligeira superioridade do tratamento N_0 sobre a média de N_1-N_2 no período 90-210 DAP. Após essa idade, o número de colmos tende a se igualar (Tabela 9) e o que prevalece são as diferenças em AFT, que determinam diferenças em IAF (Tabela 11). Então, quando a variação de peso seco em função do tempo é expressa em função do peso seco acumulado (TCR), não existem grandes diferenças entre os tratamentos. Já quando a mesma é expressa por unidade de área cultivada (TCC), surgem as diferenças mostradas na Figura 14.

O uso de TCR é mais apropriado à descrição do crescimento de plantas cultivadas isoladamente (HUNT, 1978). WARREN WILSON (1981) menciona que nas fases juvenis de crescimento, onde as plantas acumulam matéria seca de forma exponencial, a aproximação dada pela expressão $TCC = B_T \cdot TCR$.

(eq. 16) é uma descrição apropriada, na medida em que o dossel vegetativo ainda não apresenta grande competição por radiação solar. Posteriormente, quando a efetividade do dossel foliar torna-se crítica para a interceptação de radiação solar, a expressão da TCC pelo produto do IAF pela TAL é de maior relevância. A discussão prévia sobre TCR confirma esse ponto de vista.

Tabela 19. Taxas de crescimento relativo (TCR) de plantas de cana-de-açúcar cultivada sem ou com N, em função de DAP.

DAP	N_0	$N_1 - N_2$ (1)
	mg.g ⁻¹ .dia ⁻¹	
90	28,3	26,4
120	27,2	25,3
150	25,1	23,2
180	21,1	19,5
210	15,3	14,4
240	9,3	9,0
270	4,8	4,9
300	2,2	2,4
330	1,0	1,1
360	0,4	0,5
390	0,2	0,2

(1) Valores médios para 120-240 kg N.ha⁻¹.

4.6. TAXA DE ASSIMILAÇÃO LÍQUIDA

A taxa de assimilação líquida (TAL) é expressa pela relação entre a TCC e o IAF (equação 21), ou seja, é uma medida da eficiência da área assimilatória na produção de matéria seca. Se descontada a contribuição dos componentes minerais ao peso da matéria seca (usualmente entre 1 e 5%), a TAL se constitui numa estimativa da fotossíntese líquida (EVANS, 1972; HUNT, 1978), posto que qualquer acréscimo do material orgânico representa a diferença entre os ganhos da fotossíntese bruta e as perdas respiratórias.

Como já mencionado, não houve diferenças em TCC entre os tratamentos N_1 e N_2 , mas sim em IAF (Tabela 11), de tal forma que foi possível calcular a TAL para os três tratamentos, tal como mostra a Tabela 20.

O padrão geral de variação é diferente para os tratamentos que receberam N em comparação à testemunha. Nos tratamentos adubados, houve valores inicialmente altos de TAL (90 DAP, Tabela 20) em comparação ao tratamento testemunha. Não foi possível identificar uma razão plausível, desde que, como já mencionado, aos 90 DAP as respostas não exprimem efeitos de N. Provavelmente esses valores integrem os efeitos da variabilidade amostral para B_T (Tabela 15) e AFT.

Posteriormente, entre 120-150 DAP a TAL declina lentamente nesses tratamentos, para aumentar novamente aos 210 DAP, coincidentemente com os máximos de TCC (Figura 15). Após essa data, em ambos os tratamentos observa-se um declí-

nio acentuado da TAL, com valores tendendo a zero no final experimental. No tratamento N_0 o padrão é mais simples: há um aumento contínuo até os 210 DAP, com um máximo de $7,0 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e um declínio pronunciado similar ao registrado nos tratamentos N_1 e N_2 , após os 210 DAP. Como esses valores de TAL exprimem o quociente TCC/IAF, também oferecem uma estimativa da velocidade à qual ambos os processos fisiológicos (acumulação de matéria seca e área foliar) se processam. No tratamento N_0 , entre 90 e 210 DAP, a TCC aumentou pelo fator de 9,6 e o IAF pelo de 5,7, o que determina uma variação global de 1,68 para a relação TCC/IAF nesse tratamento. Já para o tratamento N_1 essa variação, no mesmo período, foi de 1,36 e no N_2 de 0,63.

Tabela 20. Taxas de assimilação líquida (TAL) de cana-de-açúcar cultivada com três níveis de N_1 em função de DAP.

DAP	N_0	N_1	N_2
	$\text{g.m}^{-2} \text{ folha.dia}^{-1}$		
90	4,20	6,92	8,78
120	5,60	5,78	5,78
150	6,30	5,49	5,08
180	6,97	6,55	6,22
210	7,04	6,64	5,60
240	5,57	5,37	5,16
270	3,72	4,14	4,45
300	2,03	2,60	2,54
330	0,98	1,17	1,17
360	0,46	0,58	0,55
390	0,21	0,29	0,25

O padrão de variação da TAL mencionado anteriormente é similar ao encontrado por MACHADO *et alii* (1982), que observaram aumentos progressivos até os 300 DAF, com um máximo de $7,0 \text{ g.m}^{-2} \text{ área foliar.dia}^{-1}$, e um posterior declínio após essa data.

Numa apreciação geral dos efeitos da aplicação de N sobre o crescimento da cana, pode ser concluído, portanto, que a mesma favorece, pela ordem: 1) aumento na população de colmos; 2) aumento no IAF; 3) aumento na taxa de crescimento de colmos e 4) aumento na taxa de crescimento da cultura.

4.7. ACUMULAÇÃO DE NITROGÊNIO NA BIOMASSA

4.7.1. Concentração de N

Nas Tabelas 21, 22 e 23 são apresentadas as concentrações médias de N (% de peso seco) no total da biomassa acumulada na parte aérea, colmos e folhas, em função dos níveis de N aplicados e das épocas de colheita.

Na Tabela 21 observa-se que a concentração de N decresce de forma contínua independentemente de tratamentos. Essa redução reflete o efeito de diluição do teor do nutriente na sua biomassa, imposta pela TCC e também pela progressiva queda no poder absorptivo do sistema radicular, conforme aumenta a idade da cultura (NYE e TINKER, 1977; RUS-

Tabela 21. Concentrações de N na biomassa (parte aérea) de cana-de-açúcar em resposta à aplicação de três níveis de N, em função de DAP

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	% matéria seca		
90	1,74 a(1)	1,57 a	1,55 a
120	1,23 b	1,31 a	1,35 a
150	0,87 b	0,94 b	1,59 a
180	0,62 c	0,71 b	0,84 a
210	0,33 c	0,56 b	0,61 a
240	0,40 b	0,47 a	0,52 a
270	0,38 c	0,43 b	0,48 a
300	0,37 c	0,41 b	0,46 a
330	0,37 c	0,41 b	0,46 a
360	0,38 b	0,40 b	0,46 a
390	0,38 b	0,41 b	0,46 a

(1) Médias seguidas de letras iguais, dentro de épocas, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de $P \leq 0,05$.

SEL, 1977). De forma geral, as concentrações de N foram superiores no tratamento N₂, seguidas pelos tratamentos N₁ e N₀. No período 150-210 DAP ocorre em todos os tratamentos, a maior diluição do teor de N na biomassa, já que nesse período processam-se as mais altas TCC (Figura 15).

Tabela 22. Concentração de N na biomassa foliar de cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	% matéria seca		
90	1,89 a(1)	1,79 a	2,02 a
120	1,91 a	2,19 a	1,49 a
150	1,67 a	1,48 b	1,26 c
180	1,31 b	1,54 a	1,37 b
210	1,15 b	1,31 a	1,24 b
240	1,24 c	1,24 b	1,39 a
270	1,13 c	1,30 b	1,73 a
300	1,18 c	1,43 b	1,69 a
330	1,22 c	1,33 b	1,46 a
360	1,28 b	1,37 a	1,34 a
390	1,34 b	1,42 a	1,49 a

(1) Médias seguidas de letras iguais entre épocas (DAP) não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

A Tabela 22 mostra as concentrações de N na biomassa foliar (B_F).

Existe um padrão similar entre os três tratamentos: há uma queda progressiva nos teores até os 210 DAP e posteriormente uma tendência de aumento, o que pode ser explicado como um processo de concentração por redução de peso seco. A redução inicial deve-se à diluição do conteúdo de N

numa fase de rápida expansão de B_F , sendo que o nível de redução é proporcional à taxa de aumento em B_F (Tabela 13). Assim, o tratamento N_2 atingiu a menor concentração (1,24%) aos 210 DAP, data na qual produz a máxima quantidade de B_F (Tabela 13). As concentrações de N na biomassa foliar encontram-se na faixa descrita por outros autores (CAPÓ e SAMUELS, 1953; CATANI *et alii*, 1959; MARZOLA, 1984; ORLANDO *Fº et alii*, 1980; SILVEIRA, 1985).

Na Tabela 23 encontram-se as concentrações de N na biomassa de colmos (B_C). Observa-se na mesma que há uma queda progressiva dos percentuais de N em B_C , até os 240-270 DAP, período no qual os valores de TCColmo tendem a diminuir (Tabela 17). Então essas diminuições refletem efeitos de diluição, ou seja a taxa de acumulação de matéria seca no colmo processa-se mais rapidamente do que a acumulação de N no mesmo. Após os 300 DAP há, entretanto, um ligeiro aumento nos percentuais de N nos colmos dos três tratamentos, mais pronunciada no tratamento N_2 , que mostrou ao final do período experimental, uma concentração de N significativamente superior aos dos outros tratamentos (Tabela 23). Esse pequeno aumento em concentração de N a partir dos 300 DAP é explicável por um efeito de concentração associado ao estresse hídrico imposto à cultura por ocasião da sua maturação. Os valores de concentração de N no colmo encontra-se dentro da faixa descrita por outros autores (CATANI *et alii*, 1959; ORLANDO *Fº et alii*, 1980; CLEMENTS, 1980; SILVEIRA, 1985).

Tabela 23. Concentração de N na biomassa de colmos de cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N, em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	% matéria seca		
90	1,18 c (1)	1,46 a	2,05 a
120	0,88 b	1,16 a	1,15 a
150	0,45 c	0,86 a	0,68 b
180	0,38 b	0,47 a	0,42 b
210	0,30 b	0,42 a	0,34 b
240	0,22 b	0,34 a	0,33 a
270	0,24 b	0,33 a	0,31 a
300	0,26 b	0,31 a	0,33 a
300	0,27 b	0,29 b	0,34 a
360	0,29 a	0,32 a	0,35 a
390	0,30 b	0,33 b	0,37 a

(1) Médias seguidas de letras iguais, dentro de época (DAP) não diferem significativamente pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

De interesse também, na Tabela 23 é a constatação que entre 240-300 DAP não existem diferenças significativas em N% entre os tratamentos N₁ e N₂, os quais como grupo, diferem significativamente do tratamento N₀.

Na Tabela 24 são apresentados os valores da quantidade de N mineral (NO₃ + NH₄) presentes no solo no pe-

Tabela 24. Quantidades de N mineral ($\text{NO}_3 + \text{NH}_4$) por unidade de superfície cultivada, acumuladas entre 0 e 0,6 m de profundidade do perfil (1).

DAP	Prof. (2)	N ₀			N ₁			N ₂		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
		g N-mineral.m ⁻² solo								
150		5,6	13,5	4,6	6,7	6,2	5,7	15,7	18,0	2,8
180		5,3	2,6	4,0	8,4	3,0	5,4	9,9	4,1	6,2
210		4,5	3,1	4,0	8,4	7,6	6,1	11,6	7,7	7,2
240		1,7	3,2	2,2	2,2	3,4	4,2	3,0	5,4	5,9
270		2,6	4,0	1,5	3,7	3,0	1,7	4,2	6,4	4,6
300		3,5	5,9	3,2	6,0	4,6	4,0	6,8	7,7	3,8

(1) Valores médios de quatro repetições por profundidade.

(2) Prof. 1: 0-0,2 m; 2: 0,2-0,4 m; 3: 0,4-0,6 m.

período 150-300 DAP (expressos como $\text{g N-mineral.m}^{-2}$ solo), nas camadas 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m respectivamente. Os valores foram calculados levando-se em consideração a concentração de NO_3 ou NH_4 (mg N.kg^{-1} solo) em cada camada e a densidade global média da mesma (Figura 7) e projetados por unidade de superfície.

Os valores constantes na Tabela 24, em geral, foram afetados por variabilidade espacial dentro das parcelas e resultaram relativamente variáveis entre repetições. Dessa forma, os mesmos devem ser tomados num sentido comparativo. Com essas ressalvas uma extrapolação simples do total de N mineral na camada 0-0,6 m indicou que aos 150 DAP os valores acumulados foram equivalentes a 237 (N_0); 186 (N_1) e 365 (N_2) kg N.ha^{-1} . Aos 270 DAP esses valores são correspondentes a 81,0 (N_0); 84 (N_1) e 152 (N_2) kg N.ha^{-1} respectivamente. Os dados sugerem uma acumulação de N ao longo do perfil no tratamento N_2 , possivelmente associada ao deslocamento vertical de NO_3 durante as irrigações efetuadas nesse período. Os dados analíticos não permitem distinguir quanto do N acumulado é nativo do solo e quanto do fertilizante, mas é claro que as quantidades de N acumuladas no solo durante o período analisado responderam à seguinte ordem: $N_2 > N_1 > N_0$. Não obstante, não há diferenças de expressão entre os percentuais de N na B_C entre os tratamentos N_1 e N_2 no período 240-300 DAP. Por outro lado, o tratamento N_2 produziu, a partir de 120 DAP uma B_C significativamente maior (Tabela 14). Então, independentemente de variações no teor

de N disponível para absorção radicular, os dados sugerem que o fator que controlou efetivamente a taxa de absorção de N (ou sua alocação em colmos) foi a TCColmo, a qual reflete a demanda metabólica dessa porção vegetativa. É claro que o tratamento N_2 acumulou N na sua biomassa além das suas necessidades produtivas. Isto, evidencia-se ao se considerar que sua maior acumulação de N não se refletiu em maior B_T (Tabela 7) em comparação ao tratamento N_1 .

4.7.2. Acumulação de N por unidade de superfície

Na Figura 17 é mostrada a variação sazonal do total de N acumulado na biomassa (U_N , parte aérea, $g \cdot m^{-2}$). Os

Figura 17. Variação estacional do N acumulado na biomassa (parte aérea) de plantas de cana-de-açúcar em resposta à aplicação de N.

dados ajustaram-se a um modelo logístico similar ao indicado pela equação (30).

Como houve diferenças estatísticas sistemáticas entre os tratamentos, a partir dos 120 DAP (Tabela 25), foram calculadas três equações descritivas da variação de U_N em função de DAP. As mesmas foram:

$$U_{N0} = \frac{13,93}{(1 + 41,85 \cdot 0,9808^{DAP})} \quad (44)$$

$$U_{N1} = \frac{16,82}{(1 + 46,56 \cdot 0,9789^{DAP})} \quad (45)$$

$$U_{N2} = \frac{19,01}{(1 + 55,27 \cdot 0,9788^{DAP})} \quad (46)$$

e como mostrado na Tabela 25, elas possuem forte aderência aos dados de campo.

Tabela 25. Valores observados de acumulação de N em função de DAP ou calculados através das funções logísticas de ajuste, para cana-de-açúcar cultivada com aplicação de N, em função de DAP.

DAP	Valores observados			Valores esperados		
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂
	g N.m ⁻²					
90	1,58 a(1)	1,50 a	1,41 a	1,68	2,15	2,11
120	3,06 c	4,53 a	4,00 a	2,74	3,65	3,65
150	4,26 c	6,60 b	7,27 a	5,24	5,80	5,92
180	6,56 c	8,85 b	9,84 a	6,12	8,40	8,79
210	8,29 c	11,09 b	12,04 a	8,13	11,00	11,81
240	9,66 c	12,81 b	14,25 a	9,96	13,15	14,41
270	10,77 c	14,36 b	15,79 a	11,39	14,66	16,39
300	12,03 c	15,46 b	17,58 a	12,39	15,61	17,51
330	12,86 c	12,26 b	18,36 a	13,02	16,16	18,21
360	13,59 c	16,45 b	18,52 a	13,41	16,40	18,61
390	13,93 c	16,82 b	19,07 a	13,63	16,53	18,83

(1) Médias seguidas de letras comuns, não diferem entre épocas (DAP), pelo teste de Tukey, ao nível de $p \leq 0,05$.

4.7.3. Taxa de acúmulo absoluto de N

A taxa de acúmulo absoluto de N, dada pela equação (23), representa outra forma de expressão da TCC, baseada apenas no conteúdo de N na biomassa ($\text{g.U}_\text{N}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). Portanto, representa a derivada primeira das equações (44), (45) e (46), que quantitativamente são expressas pelas seguintes funções:

$$\text{TAA}_{\text{N}_0} = \frac{11,30 \cdot 0,9808^{\text{DAP}}}{(1 + 41,85 \cdot 0,9808^{\text{DAP}})^2} \quad (47)$$

$$\text{TAA}_{\text{N}_1} = \frac{16,70 \cdot 0,9789^{\text{DAP}}}{(1 + 46,56 \cdot 0,9789^{\text{DAP}})^2} \quad (48)$$

$$\text{TAA}_{\text{N}_2} = \frac{22,58 \cdot 0,9788^{\text{DAP}}}{(1 + 55,30 \cdot 0,9788^{\text{DAP}})^2} \quad (49)$$

Os valores de TAA_N para os três níveis de aplicação de N constam na Tabela 26.

Os dados mostram que os valores máximos de TAA_N ocorrem entre 150-180 DAP. Aos 180 DAP há um pico diário de 66, 90 e 101 $\text{mg N.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 respectivamente. Após essa data, os valores declinam rapidamente e tendem a se igualar por volta dos 300 DAP. Até essa data, o tratamento N_2 mostrou valores ligeiramente superiores (Tabela 26).

Tabela 26. Taxas de acumulação absoluta de N, em cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N, em função de DAP.

DAP	N_0	N_1	N_2
	mg N.m ⁻² solo.dia ⁻¹		
90	28,6	39,9	40,2
120	42,6	61,0	63,2
150	57,2	81,0	87,4
180	66,5	89,7	101,5
210	65,6	81,0	96,3
240	55,0	61,1	75,4
270	40,3	40,1	50,7
300	26,6	23,9	30,7
330	16,4	13,5	17,5
360	9,7	7,4	9,6
390	5,6	4,0	5,2

Os valores de TAA_N obtidos no presente trabalho são da mesma magnitude que os mostrados por SILVEIRA (1985). Um fato interessante é que o máximo valor aqui obtido, 101,5 mg N.m⁻².dia⁻¹, verificado aos 180 DAP no tratamento N_2 , é quase igual ao observado por esse autor (103,02 mg N.m⁻².dia⁻¹), aos 120 DAP em resposta à aplicação de 450 kg N.ha⁻¹, trabalhando com a mesma variedade. Isto sugere, como hipótese preliminar, que provavelmente acima de 200 kg N.ha⁻¹, os influxos radiculares de N estejam próximos do poten

cial genético absorutivo nesta variedade, e portanto não respondam ao aumento de concentração de N mineral no solo decorrente da aplicação de quantidades maiores de adubo nitrogenado. Isto implicaria em que o influxo radicular tornaria-se independente da concentração externa de N mineral e ficaria na dependência da interação entre o potencial de crescimento da variedade e as condições ambientais prevalecentes durante a estação de crescimento, ou seja, da sua TCC.

A confirmação desta hipótese exige estudos adicionais na faixa de aplicação externa de $200-500 \text{ kg N.ha}^{-1}$, se bem que do ponto de vista prático não sejam esperáveis retornos produtivos além de 120 kg N.ha^{-1} (item 4.9).

Os valores máximos de TAA_N ocorreram aos 180 DAP, portanto um mês antes da ocorrência dos valores máximos em TCC (Figura 15). Esse resultado confirma observações anteriores de que os valores máximos de acumulação de N precedem, no tempo, os de matéria seca (HUMBERT, 1974; CLEMENTS, 1980; SILVEIRA, 1985), quando os mesmos são expressos por unidade de superfície cultivada.

4.7.4. Taxa de acúmulo relativo de N

A taxa de acúmulo relativo ($TAR, \text{gU.gU}^{-1}.\text{dia}^{-1}$) representa a analogia da TCR, quando a análise de crescimento é feita com base no conteúdo do nutriente na biomassa. Os valores de TAR_N correspondentes aos três tratamentos estudados, são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27. Taxas de acúmulo relativo de N, em cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N, e em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	mg N.g ⁻¹ N.dia ⁻¹		
90	17,0	18,6	19,0
120	16,1	16,7	19,3
150	13,2	14,0	14,8
180	11,0	10,8	11,5
210	8,0	7,4	8,1
240	5,0	4,6	5,2
270	4,0	2,8	3,1
300	2,0	1,5	1,8
330	1,3	0,8	1,0
360	0,7	0,5	0,5
390	0,4	0,2	0,3

Como a mesma indica, o tratamento N₂ mostra valores ligeiramente superiores até os 150 DAP, e depois dessa data os valores dos três tratamentos tendem a zero, sem muitas diferenças até o final do período experimental. Os valores de TAR_N declinam de uma forma similar aos de TCR (Figura 16). A expressão da TAR_N sofre das mesmas restrições mencionadas para TCR: discrimina efeitos diferenciais da adição de N apenas quando o dossel vegetativo mantém-se aberto, e portanto sem competição por radiação solar. Após 150 DAP, quando o dossel intercepta acima de 80-90% da RFA inciden-

te (Tabela 16); é mais apropriado o uso de TAA_N (Tabela 26), a qual parece exprimir melhor diferenças na absorção de N.

As equações descritivas dos valores de TAR_N mostrados na Tabela 27, são, pela ordem:

$$TAR_{N_0} = \frac{0,8113 \cdot 0,9808^{DAP}}{(1 + 41,85 \cdot 0,9808^{DAP})} \quad (50)$$

$$TAR_{N_1} = \frac{0,9929 \cdot 0,9789^{DAP}}{(1 + 46,56 \cdot 0,9789^{DAP})} \quad (51)$$

$$TAR_{N_2} = \frac{1,184 \cdot 0,9788^{DAP}}{(1 + 55,30 \cdot 0,9788^{DAP})} \quad (52)$$

4.8. ACUMULAÇÃO DE POTÁSSIO NA BIOMASSA

O potássio (K) é um nutriente que não constitui variável experimental no presente trabalho, e portanto os valores da sua concentração, e acúmulo na biomassa, de forma absoluta e relativa (Tabelas 28, 29 e 30), servem como informação complementar. Não obstante, é sabido que o K, junto com o N estimulam não somente o crescimento como o nível de hidratação de colmos e folhas de cana. A correlação entre o teor de K nas bainhas e o seu teor de umidade, é usada com finalidade diagnóstica para efeitos de irrigação em várias regiões produtoras do mundo (SAMUELS et alii, 1953; HUMBERT, 1974; CLEMENTS, 1980).

4.8.1. Concentrações de K

As tabelas 28, 29 e 30 mostram os teores de K na biomassa total, e nas folhas e colmos, observados no presente experimento.

Tabela 28. Concentração de K na biomassa (parte aérea) de plantas de cana-de-açúcar, cultivadas com três níveis de N, em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	% matéria seca		
90	2,43 c(1)	3,56 b	4,44 a
120	2,07 a	1,98 a	2,09 a
150	1,64 a	1,38 b	1,12 c
180	1,16 a	1,09 b	0,92 c
210	0,81 a	0,57 b	0,75 a
240	0,62 a	0,60 a	0,64 a
270	0,53 ab	0,49 b	0,56 a
300	0,49 a	0,48 a	0,52 a
330	0,47 b	0,49 ab	0,52 a
360	0,47 b	0,50 b	0,54 a
390	0,43 b	0,45 b	0,52 a

(1) Médias seguidas de letras iguais não diferem dentro de época, pelo teste de Tukey ao nível de $P \leq 0,05$.

Tabsla 29. Concentração de K na biomassa foliar de plantas de cana-de-açúcar, cultivadas com três níveis de N, em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	% matéria seca		
90	1,43 b(1)	2,96 a	2,98 a
120	1,33 c	1,49 b	1,76 a
150	1,97 a	1,15 b	1,04 b
180	1,30 a	1,00 b	1,01 b
210	1,14 a	1,06 ab	0,86 b
240	1,12 a	1,13 a	1,02 b
270	1,20 b	1,40 a	1,34 ab
300	1,26 c	1,66 a	1,52 b
330	1,23 c	1,61 a	1,51 b
360	1,31 c	1,70 a	1,55 b
390	1,20 c	1,69 a	1,55 b

(1) Médias seguidas de letras iguais, dentro de época, não diferem, pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$

De forma geral, observa-se um declínio na concentração de K na biomassa, dependente da época de colheita, nos três tratamentos (Tabela 28). Não há um efeito acentuado do nível de aplicação de N sobre a redução dos percentuais de K na biomassa, o que permite concluir que a mesma foi decorrente apenas das variações da produção de matéria seca entre tratamentos, induzida pela aplicação de N (Tabe-

Tabela 30. Concentração de K na biomassa de colmos de plantas de cana-de-açúcar, cultivadas com três níveis de N, em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	% matéria seca		
90	4,36 b(1)	4,78 b	5,63 a
120	2,76 a	2,59 b	2,32 c
150	1,46 b	1,77 a	1,16 c
180	1,10 b	1,30 a	0,90 b
210	0,71 b	0,79 a	0,73 ab
240	0,52 c	0,56 b	0,60 a
270	0,43 a	0,44 a	0,46 a
300	0,39 ab	0,38 b	0,42 a
330	0,39 a	0,38 a	0,39 a
360	0,36 a	0,37 a	0,42 a
390	0,33 b	0,34 b	0,40 a

(1) Médias seguidas de letras iguais, dentro de época, não diferem, pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

la 7 e Figura 14). A concentração de K na biomassa foliar segue um padrão similar à variação em B_F entre tratamentos (Tabela 13): até os 240 DAP há uma progressiva diluição e após essa data um ligeiro aumento, indicativa de que, mesmo em pequena magnitude, as plantas acumularam K, nesse período, a taxas maiores do que as correspondentes à matéria seca. Entretanto, a maior influência sobre os percentuais de K na B_F,

é devida à redução progressiva de K na biomassa de colmos. Como mencionado previamente (item 4.4.2), a B_C mostrou uma progressão de tipo logístico com o tempo, de forma similar a B_T . Como a relação B_C/B_T aumenta em função de DAP (Tabela 14), as quedas nas concentrações de K na B_T são uma consequência esperada, da mesma forma como ocorre com as concentrações de N (Tabela 21).

4.8.2. Acúmulo de K por unidade de superfície

Na Figura 16 é mostrada a variação sazonal do total de K acumulado na biomassa (U_K , parte aérea, $g.m^{-2}$). Os dados ajustaram-se, de forma similar ao acúmulo de N (Figura 15), a um modelo logístico, com os seguintes parâmetros entre tratamentos:

$$U_{K(N_0)} = \frac{16,25}{(1 + 56,09 \cdot 0,9743DAP)} \quad (53)$$

$$U_{K(N_1)} = \frac{19,69}{(1 + 43,83 \cdot 0,9769DAP)} \quad (54)$$

$$U_{K(N_2)} = \frac{22,05}{(1 + 24,29 \cdot 0,9811DAP)} \quad (55)$$

Figura 18. Variação estacional do K acumulado na biomassa (parte aérea) de plantas de cana-de-açúcar em resposta à aplicação de N.

A Tabela 31 mostra que os valores calculados pela aplicação das equações (53-55) ajustam-se estreitamente aos valores observados. A mesma tabela indica que a partir dos 180 DAP, houve diferenças sistemáticas entre os valores de U_K correspondentes aos três níveis de adubação nitrogenada.

As concentrações de K na biomassa da parte aérea, folhas e colmos, assim como os valores de U_K estão dentro da faixa relatada por outros autores (CLEMENTS, 1980; ORLANDO Fº et alii, 1980; SILVA e CASAGRANDE, 1983; SILVEIRA, 1985).

Tabela 31. Valores observados de acumulação de K na biomassa (parte aérea) em função de DAP, ou calculados através das funções logísticas de ajuste, para cana-de-açúcar com aplicação de N.

DAP	Valores observados			Valores calculados		
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₀	N ₁	N ₂
	g K.m ⁻²					
90	2,35 b(1)	3,18 a	3,08 a	2,62	3,10	4,12
120	4,60 c	5,51 b	6,44 a	4,83	5,39	6,39
150	8,00 b	8,53 b	9,22 a	7,87	8,50	9,26
180	11,39 c	12,83 b	13,89 a	11,04	11,91	12,39
210	13,74 c	14,92 b	16,66 a	13,54	14,87	15,32
240	15,35 c	16,80 c	18,48 a	15,11	16,97	17,68
270	16,02 c	17,76 b	18,97 a	15,96	18,24	19,35
300	16,34 c	18,30 b	19,86 a	16,38	18,94	20,44
330	16,55 c	19,51 b	21,11 a	16,58	19,31	21,11
360	16,25 c	19,69 b	22,05 c	16,67	19,50	21,51
390	15,62 c	18,46 b	21,42 a	16,71	19,60	21,74

(1) Médias seguidas de letras comuns, não diferem, dentro de épocas, pelo teste de Tukey, ao nível de

P ≤ 0,05.

4.8.3. Taxa de acúmulo absoluto de K

Os valores de TAA_K são mostrados na Tabela 32. Observa-se na mesma que os valores de TAA_K , mostraram valores máximos no período 150-180 DAP, de forma similar ao que aconteceu com relação ao acúmulo de N por unidade de superfície cultivada (Tabela 26). A comparação entre as TAA de K e N (Tabelas 26 e 31) indica que a cultura processou, nas fases iniciais de crescimento, uma mais rápida acumulação de K do que N. Assim, aos 150 DAP a relação entre ambas as taxas vale: 1,89; 1,39 e 1,17 para os tratamentos N_0 , N_1 e N_2 respectivamente. Aos 180 DAP essa mesma relação é de: 1,47, 1,22 e 0,98 respectivamente. Esses dados sugerem que, no período de máximo acúmulo de nutrientes, a adição de N estimulou em maior grau a co-absorção de K em relação à do próprio N (desde que seja suposto que nessa data as raízes estavam absorvendo o cátion K e o anion NO_3). A Tabela 32 também indica que a partir dos 210 DAP houve um acúmulo superior no tratamento N_2 , o que pode ser explicado pela sua maior TCC durante essa fase.

Tabela 32. Taxas de acúmulo absoluto de K, em cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N, em função de DAP.

DAP	N ₀	N ₁	N ₂
	mg K.m ⁻² .dia ⁻¹		
90	57,6	61,1	64,0
120	89,5	91,5	86,7
150	108,6	112,9	102,6
180	98,0	112,0	103,7
210	67,5	85,0	89,4
240	38,5	54,9	67,0
270	19,7	31,4	40,9
300	9,5	16,8	28,5
330	4,4	8,7	17,1
360	2,1	4,4	10,0
390	0,1	2,2	5,8

4.8.4. Taxa de utilização específica

As taxas de utilização específica (TUE) de um dado nutriente é dada pela relação entre a TCC da cultura e o conteúdo do nutriente (U) na sua biomassa (equação 26).

A TUE para N e K são apresentadas nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33. Taxa de utilização específica de N, em cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N, em função de DAP.

DAP	N_0	N_1	N_2
	g M.S.g ⁻¹ N.dia ⁻¹		
90	1,63	1,67	1,71
120	2,21	2,06	1,88
150	2,89	2,47	1,97
180	3,39	2,73	2,62
210	3,21	2,56	2,39
240	2,29	1,90	1,74
270	1,26	1,13	1,01
300	0,59	0,58	0,52
330	0,26	0,27	0,24
360	0,11	0,12	0,11
390	0,05	0,06	0,05

Os valores de TUE constantes nessas Tabelas foram estimados a partir dos valores calculados para TCC (Figura 15) e acúmulo de N e K (Figuras 17 e 18). Os dados constantes na Tabela 33 indicam que a TUE_N teve um mesmo padrão de variação entre tratamentos.

Até os 180 DAP houve aumento progressivo e após essa data uma queda gradual, tendendo a zero ao final do período experimental. Aos 180 DAP ocorreram picos de TUE de 3,4; 2,7 e 2,6 g M.S. g⁻¹ N.dia⁻¹, para os tratamentos N_0 , N_1 ,

e N_2 respectivamente. Esses dados confirmam resultados anteriores de que a aplicação de doses elevadas de N deprimem a TUE_N . Assim, aos 180 DAP, quando ocorrem os máximos de acumulação de N por unidade de superfície, a TUE_N correspondente ao tratamento N_2 resultou inferior à correspondente ao tratamento N_0 em 22,7%. Essa observação confirma as apreciações feitas no item 2.2.5.

Tabela 34. Taxa de utilização específica de K, em cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de N, em função de DAP.

DAP	N_0	N_1	N_2
	g M.S. $g^{-1} K \cdot dia^{-1}$		
90	1,16	1,13	1,17
120	1,32	1,36	1,23
150	1,53	1,70	1,55
180	1,82	1,83	1,66
210	1,90	1,89	1,69
240	1,48	1,49	1,35
270	0,90	0,93	0,87
300	0,45	0,49	0,45
330	0,20	0,23	0,21
360	0,09	0,10	0,09
390	0,04	0,05	0,04

A Tabela 34 mostra que a TUE_K da biomassa da parte aérea foi afetada de modo similar à TUE_N pela aplicação de N. Inicialmente há um progressivo aumento da TUE_K nos três tratamentos, que atinge valores máximos entre 150-180 DAP. Depois verifica-se uma queda progressiva, com valores tendendo a zero no final do período experimental. Da mesma forma que se verifica com relação à utilização de N, os valores de TUE_K foram menores para o tratamento N_2 durante o período de máxima absorção desse nutriente (150-210 DAP).

4.9. PRODUTIVIDADE FINAL

Nas Tabelas 35 e 36 são mostrados os dados relativos à biomassa fresca de colmos colheitada aos 405 DAP, a relação peso seco/peso fresco (PS/PF) e os dados relativos à extração final de N pela cultura.

Observa-se na Tabela 35 que a aplicação de N resultou em uma produtividade maior em relação ao tratamento N_0 , embora não houvesse diferença significativa entre as produções dos tratamentos N_1 e N_2 (125 vc. 135 TCH). Em termos de rendimento relativo (R.R. %), tomando-se o máximo valor (N_2) como igual a 100%, a produção de N_1 correspondeu a 92,4 e a de N_0 a 79,4%. Esse resultado confirma a afirmação anterior (Figuras 1 e 2 e Tabela 1) de que para a obtenção de um contraste significativo a diferença entre o nível superior e o de qualquer outro deve oscilar em torno de 10%.

Tabela 35. Produção de colmos (rendimentos absolutos e relativos) e relação peso seco/peso fresco em resposta à aplicação de três níveis de N.

Tratamento	B_C (peso fresco)			
	kg.m^{-2}	TCH	R.R. (%)	PS/PF
N_0	10,79 b (1)	107,87 b	79,7	0,315
N_1	12,50 a	124,99 a	92,4	0,303
N_2	13,54 a	135,34 a	100,0	0,291

(1) Médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente, pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

Tabela 36. Nitrogênio total acumulado no colmo e parte aérea, e relação N colmo/N parte aérea em resposta à aplicação de três níveis de N_1 .

Tratamento	Colmo		P.aérea		kg N
	g.m^{-2}	kg.ha^{-1}	g.m^{-2}	kg.ha^{-1}	colmo kg N-P.A.
N_0	9,95c (1)	99,53c	14,01c	140,1c	0,71
N_1	12,16b	121,62b	16,78b	167,86b	0,72
N_2	14,21a	142,10a	18,63a	186,3a	0,76

(1) Médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente, pelo teste de Tukey, ao nível de $P \leq 0,05$.

O uso de oito repetições na avaliação final foi apropriada para a manutenção de um baixo C.V. para TCH (6,2%).

AZEREDO *et alii* (1986), em experimento conduzido na Usina Queimado (Campos, RJ), sobre um Cambissolo Eutrófico, de propriedades físico-químicas similares às do solo utilizado, obtiveram resultados muito próximos. Esses autores observaram uma resposta de tipo quadrático por TCH, em função da aplicação de 0, 120 e 180 kg N.ha⁻¹. A produção dos níveis 120 e 180 kg.ha⁻¹ foram de 134 e 139 TCH, respectivamente. A produção ao nível N₀, foi inferior à observada neste trabalho (61 vs. 107,9 TCH).

Com relação ao N total acumulado (e exportado pela cultura) por ocasião da colheita, observou-se que houve diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 36), de forma similar ao observado durante o período de crescimento vegetativo. O total de N acumulado no colmo foi máximo no tratamento N₂ (142,1 kg N.ha⁻¹). Esses valores resultaram inferiores em 14,4 e 30% nos tratamentos N₁ e N₀. Portanto, as diferenças finais em acumulação de N no colmo foram maiores que as correspondentes à acumulação de biomassa, explicando assim a ordem de significação estatística obtida nas duas séries de dados (Tabelas 35 e 36). Os valores de UNC/UN-PA foram de 0,71 (N₀), 0,72 (N₁) e 0,76 (N₂) (Tabela 36). Os valores dessa relação são aproximadamente similares aos obtidos por outros autores, trabalhando com a mesma variedade, em condições de campo (Tabela 3).

Na Tabela 35 está indicado o valor da relação PS/PF para os três tratamentos. Observou-se que por ocasião da colheita os colmos do tratamento N_2 resultaram ligeiramente mais suculentos que os obtidos dos outros tratamentos (porcentagens de matéria seca de 29,1; 30,3 e 31,5 para N_2 , N_1 e N_0 respectivamente). Os percentuais de umidade no colmo foram de 70,9 (N_2), 69,7 (N_1) e 68,5 (N_0). Esses valores estão dentro das faixas recomendadas para a indução da maturação (BONNET, 1969; HUMBERT, 1974; CLEMENTS, 1980).

A maior suculência do colmos produzidos pelo tratamento N_2 , associados a um menor percentual de fibra (Tabela 39) são um reflexo de maiores percentuais de umidade durante a estação de crescimento. Como discutido previamente (item 4.2.2) isto pode ser devido a uma maior densidade ou comprimento radicular nesse tratamento, induzida por uma maior quantidade de nutrientes disponível na camada subsuperficial e/ou maior conservação de umidade do solo, a favor de um maior IAF (Tabela 11).

Em síntese, a aplicação de uma dose relativamente elevada de N (240 kg N.ha^{-1}) induziu uma maior suculência nos tecidos do colmo, maior acumulação de matéria seca (Tabela 14) e maior concentração de N no mesmo.

Pode ser concluído, portanto, que a aplicação de um excesso de N produziu uma acumulação real de N na biomassa (não decorrente de um mero efeito de concentração), que não teve como contrapartida uma produção significativamente superior de colmos industriais (Tabela 35).

A Tabela 37, que mostra os valores finais de EU_N e do seu inverso, o requerimento interno de N, apoia esta conclusão. Observa-se na mesma que a EU_N decresceu conforme aumentou o nível de aplicação de N, tanto expressa como kg.cana . kg N^{-1} colmo) ou como kg.cana.kg $^{-1}$ N-PA. Os valores máximos dessas relações ocorrem ao nível N_0 (1083,9 e 770,0 respectivamente). Tomando-se esses valores como iguais a 100%, a redução de EU_N (base kg cana.kg $^{-1}$ N colmo) foram de 5,2 e 12% para os tratamentos N_1 e N_2 . Esse resultado era de se esperar, dado os menores valores de TUE_N nesses tratamentos durante o período de máximas taxas de absorção de N (Tabela 33). Os valores de EU_N calculados no presente trabalho são compatíveis com os calculados a partir de outros autores (Tabela 3).

Tabela 37. Eficiência de uso de N e requerimento interno para produção de colmos, em resposta à aplicação de três níveis de N.

Tratamento	Eficiência de uso		Requerimento de N	
	kg cana	kg cana	kg N	kg N
	kg N-colmo	kg N-PA	Tn-colmo	Tn-PA
N_0	1083,8	769,9	0,92	1,30
N_1	1027,7	744,9	0,97	1,34
N_2	952,4	726,6	1,05	1,38

A progressiva redução em EU_N conforme aumenta o nível de aplicação de N mineral foi observada previamente por vários autores (ROA e NARASIMHAM, 1956; INGRAM e HILTON, 1983; SILVEIRA, 1985; GASCHO *et alii*, 1986).

Aparentemente, isto é devido a uma produção excessiva de colmos na fase inicial de crescimento (Tabela 9), mas principalmente por uma alta taxa de alocação de matéria seca em folhas (Tabela 14). Isto resulta num aumento drástico do IAF expandido no período de crescimento máximo (210-240 DAP, Tabela 11). Essa super-produção de área foliar não guarda relação com a produtividade final, tanto quando estimada pelo rendimento agrícola (TCH, Tabela 35) ou pela porcentagem de sacarose aparente no caldo (Tabela 38).

4.10. QUALIDADE DO CALDO

Na Tabela 38 são apresentados dos dados relativos à qualidade do caldo extraível, expressos, convencionalmente, pelo seu teor de sacarose aparente (Pol % caldo), de sólidos solúveis (Brix % caldo), a sua pureza, açúcares reductores e totais no caldo e a porcentagem de fibra.

De uma forma geral não foram observados efeitos de grande significação entre tratamentos. Não foi observada nenhuma diferença em Pol (% caldo) entre tratamentos. Então, na presente variedade a aplicação de N até o nível de 240 kg N.ha^{-1} não parece afetar o teor de sacarose aparen-

te no caldo extraível. Em outras variedades, a esse nível de aplicação, observa-se uma depressão do Pol (% caldo) (CLEMENTS, 1980; MARZOLA, 1984).

Tabela 38. Porcentagens de pol brix, pureza e açúcares redutores e totais no caldo, e de fibra em cana-de-açúcar, em resposta à aplicação de três níveis de N.

Tratamento	Pol	Brix	AR	AT	Pureza	Fibra
	% do caldo				%	% cana
N ₀	18,04a(1)	20,61b	0,418a	18,78a	87,53a	13,52a
N ₁	18,53a	21,27a	0,476a	19,56a	87,12a	13,24a
N ₂	18,67a	21,12a	0,454a	19,01a	88,35a	12,71b

(1) Médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente pelo teste de Tukey entre tratamentos.

Como já mencionado, o efeito mais evidente foi uma redução significativa no porcentual de fibra na cana, associada ao tratamento N₂ (Tabela 38). Como consequência disso, o Pol (% cana) teve os seguintes valores: 15,6 (N₀), 16,08 (N₁) e 16,29 (N₂). Houve diferença significativa entre o tratamento N₀ e os tratamentos N₁ e N₂. Quando esses valores são usados para estimar um possível rendimento agrícola (Tn Pol.ha⁻¹) encontram-se os seguintes valores: 16,82 (N₀); 20,10 (N₁) e 22,05 (N₂). Isto indica que a adição de

N teve maior efeito sobre a produção de colmo que sobre a porcentragem de sacarose aparente no mesmo. Conclusão similar foi obtida por AZEREDO et alii (1986).

5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos no presente trabalho permitem inferir as conclusões a seguir:

A aplicação de N dentro da faixa de 120 - 240 kg.ha⁻¹, promoveu um aumento do crescimento vegetativo, traduzido em maior perfilhamento inicial e maior produção de biomassa na parte aérea.

Houve, em consequência, maiores taxas de crescimento da cultura nesses tratamentos, mas principalmente maior crescimento de colmos e expansão de área foliar. A aplicação de N implicou no aumento da área foliar por planta sem afetar entretanto, a taxa de elongação do colmo e consequentemente, a altura do mesmo.

A aplicação de N propiciou um mais rápido fechamento do dossel vegetativo e consequentemente, maior interceptação de radiação solar, em decorrência de aumentos no IAF. Maior o nível de aplicação de N, maior a velocidade com a qual esse processo operou.

Houve uma acumulação de N e K na biomassa da

parte aérea e colmos proporcional ao nível de N aplicado. As variações sazonais da mesma foram descritas adequadamente por uma função de tipo logístico. No caso do N a sua taxa máxima de acúmulo precedeu no tempo a taxa máxima de acúmulo de matéria seca.

A aplicação de N afetou a eficiência de utilização do mesmo no acúmulo de matéria seca. Maior o nível de aplicação, mais ineficientes as plantas se mostraram no seu uso. Em decorrência, não houve resposta produtiva apreciável além de 120 kg N.ha^{-1} . Para os Cambissolos Eutróficos da região da Baixada de Campos, RJ, resultará antieconômica a aplicação de níveis superiores de N na adubação da cana-de-açúcar. Por outro lado, a aplicação de N não afetou significativamente a qualidade do caldo. O nível superior de aplicação (240 kg N.ha^{-1}) reduziu o percentual de fibra na cana. A determinação dos fatores que afetam a eficiência de uso de N deverão ser estudados numa faixa maior de aplicação de N que a empregada no presente experimento, devendo-se desenvolver métodos apropriados ao estudo do sistema radicular em solos de textura argilosa.

Do ponto de vista metodológico, os presentes dados mostram a utilidade de se expandir as técnicas convencionais da análise de crescimento ao estudo da marcha de absorção e acumulação de nutrientes na biomassa da cultura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, G.A.C. de & MARINHO, M.L. Efeitos do parcelamento e épocas de adubação da cana-de-açúcar em Alagoas. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 100: 17-23, 1982.
- ALEXANDER, A.G. The energy cane alternative. New York, Elsevier, 1985. 509p. (Sugar Series, 6).
- ALVARES, R.; AMARAL, A.Z.; ARRUDA, H.V. Ensaio de adubação NPK em cana-de-açúcar. Bragantia, Campinas, 19: 1062-1069, 1960.
- ALVARES, R. & PACHECO, J.A. de C. Adubação da cana-de-açúcar. VII. Ensaio preliminar de adubação N-P-K, no arenito de Bauru. Bragantia, Campinas, 22: 194-200, 1963.
- ALVARES, R.; SEGALLA, A.L.; WUTKE, A.C.P.; FREIRE, E.S. Adubação da cana-de-açúcar. VIII. Adubação mineral em solos Massapê-Salmourão (1957-58). Bragantia, Campinas, 22: 657-675, 1963.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; LEAL, J.R.; ROSIELLO, R.O.P. Denitrificação e imobilização de nitrogênio em solo tratado com vinhaça. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 7: 263-268, 1983.

- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; LUISI, M.V.V.; ROSSIELLO, R.O.P.; VELLOSO, A.C.X.; LEAL, J.R. Transformações do nitrogênio mineral em solo Podzólico Vermelho-amarelo tratado com vinhaça. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 22: 249-256, 1987.
- ASANA, R.D. Growth analysis of the sugar-cane crop in North Bihar (India). Annual Botany, Londres, 14: 465-485, 1950.
- AZEREDO, D.F.; ROBAINA, A.A.; MANHÃES, M.S. Adubação mineral (NPK) em cana-planta nos Estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (Zona da Mata). Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 95: 19-28, 1980.
- AZEREDO, D.F.; ROBAINA, A.A.; MANHÃES, M.S.; VIEIRA, J.R. Adubação da cana-de-açúcar nos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (Zona da Mata e Região Norte). Boletim Técnico Planalsucar, Piracicaba, 3: 1-24, 1981.
- AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta - doses e fracionamento. STAB, Piracicaba, 4: 26-33, 1986.
- BARNES, A. & HOLE, C.C. A theoretical basis of growth and maintenance respiration. Annual Botany, Londres, 42: 1217-1221, 1978.
- BITTENCOURT, V.C.; FAGENELLO, B.F.; SALATA, J.C. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta). STAB, Piracicaba, 5: 25-29, 1986.
- BLAD, B.L. Atmospheric demand for water. In: TEARE, J.D. & PEET, M.M., ed. Crop-Water Relations. New York, 1983. p.1-44.

- BÖHM, W. Methods of studying root systems. New York, Springer-Verlag, 1979. 188p.
- BONNET, J.A. Biosynthesis of sucrose and factors affecting its yield in sugar cane. Sugar y Azucar, New York, 64: 42-65, 1969.
- BREMNER, J.M. Inorganic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. parte 2, p.1179-237 (Agronomy, 9).
- BREMNER, J.M. & KEENEY, D.R. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. Anal.Chim. Acta., 32: 485-95, 1965.
- BRINHOLI, O.; MACHADO, J.R.; LIEM, T.H. Estudo comparativo de formas e doses de nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar (cana de ano e meio). Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 96: 60-64, 1980.
- BRINHOLI, O.; MACHADO, J.R.; LIEM, T.H. Estudo comparativo de formas e doses de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar (cana de ano). Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 97: 232-238, 1981.
- BRODIE, H.W.; YOSHIDA, R.; NICKELL, L.G. Effect of air and root temperatures on growth of four sugarcane clones. Hawaiian Planter's Record, Honolulu, 58: 21-44, 1969.
- BULL, T.A. & GLASZIOU, K.T. Sugar cane. In: EVANS, L.T., ed. Crop Physiology: Some Case Histories. Cambridge, Cambridge University Press, 1975. p.51-72.

- BURR, G.O.; HARTT, C.E.; BRODIE, H.W.; TANIMOTO, T. HORTSCHARK, H.P.; TAKANASHI, D.; ASHTON, F.M.; COLEMAN, R. E. The sugarcane plant. Annual Review Plant Physiology, 8: 275-308, 1957.
- CAPÓ, B.G. & SAMUELS, G. The development of a mathematical concept to interpret the relation between plant composition and crop yield. The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico, Rio Pedras, 37: 249-264, 1953.
- CARVALHO, L.C.C. Adubação e a cana-de-açúcar no Brasil. In: ORLANDO Fº, J., Coord. Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar no Brasil, Piracicaba, Coleção PLANALSUCAR nº 2, 1983. p.13-21.
- CATANI, R.A.; ARRUDA, H.C.; PELEGRINO, D.; BERGAMIN Fº, H. A absorção de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre e silício pela cana-de-açúcar, Co 419 e o seu crescimento em função da idade. Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 16: 167-170, 1959.
- CAVALCANTI, F.J. de A.; FERNANDES, C.S.; GOMES, R.V.; MOURA, R.J.M. de. Lucro com adubação NPK na cana-de-açúcar em Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 3: 115-120, 1979.
- CHAPIN III, F.S. & BIELESKI, R.L. Mild phosphorus stress in barley and related low-phosphorus-adapted barley grass: phosphorus fraction and phosphate absorption in relation to growth. Physiology Plantarum, Copenhagen, 54: 309-315, 1982.
- CHARLES-EDWARDS, D.A. Physiological determinants of crop growth. London, Academic Press, 1982. 161p.

- CLARK, R.B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation and use of mineral elements required for plant growth. Plant and Soil, The Hague, 72: 175-96, 1983.
- CLEMENTS, H.F. Sugarcane crop logging and crop control: principles and practices. Honolulu, University Press of Hawaii, 1980. 520p.
- COSTA, E.C. A importância da irrigação para o desenvolvimento agrícola fluminense. A Lavoura, maio/junho, 1980.
- DE FREITAS, V.R.; VITORIA, R.L.; RUSCHEL, A.P.; VOSE, P.E.. Estimation of N₂-fixation by sugar cane, *Saccharum* sp., and soybean, *Glycine max*, grown in soil with ¹⁵N labelled organic matter. Plant and Soil, The Hague, 82: 257-61.
- DOBEREINER, J. Nitrogen fixing bacteria of the genus *Beijerinckia* Derx. in the rhizosphere of sugar cane. Plant and Soil, The Hague, 15: 211-17, 1961.
- ESPIRONELO, A.; OLIVEIRA, H. de; NAGAI, H.V. Efeitos da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (cana-planta) em anos consecutivos de plantio. I. Resultados de 1974/75 e 1975/76. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1: 76-81, 1977.
- ESPIRONELO, A.; OLIVEIRA, H.; NAGAI, V. Efeitos da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (cana planta) em anos consecutivos de plantio. II. Resultados de 1976/78 e conclusões finais (1974/78). Bragantia, Campinas, 39: 27-38, 1980.
- EVANS, G.C. The quantitative analysis of plant growth. Oxford/London, Blackwell Scientific Publication, 1972. 734p.

- FARIA, C.M.B.; MORGADO, L.B.; PEREIRA, J.R.; ARAGÃO, O.P. In fluência de fontes e níveis de nitrogênio na cultura da cana-de-açúcar irrigada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 18: 849-853, 1983.
- FERNANDES, M.S. Absorção e metabolismo de nitrogênio em plantas. Boletim técnico. U.F.R.R.J. Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, 1: 1-50, 1978.
- FERNANDES, M.S. & ROSSIELLO, R.O.P. Aspectos do metabolismo e utilização do nitrogênio em gramíneas tropicais. In: MATOS, H.B., ed. Calagem e Adubação de Pastagens, Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p.93-123.
- FERNANDES, M.S.; ROSSIELLO, R.O.P. & BENDIX, M.E. Effects of N-source, light intensity and temperature on nutrient metabolism of Bahiagrass. Journal of Plant Nutrition, New York, 8: 945-963, 1985.
- FISHER, N.M. Crop growth and development: the vegetative phase. In: GOLDSWORTHY, P.R. & FISHER, N.M., ed. The Physiology of Tropical Fields Crops. New York, 1984. p.119-162.
- GALLO, J.R. Levantamento do estado nutricional de canaviais do Estado de São Paulo. Bragantia, Campinas, 27: 365-382, 1968.
- GASCHO, G.J.; ANDERSON, D.L.; OZAKI, H.Y. Cultivar dependent sugarcane response to nitrogen. Agronomy Journal, Madison, 78: 1064-1069, 1986.
- GERLOFF, G.C. Plant efficiency in the use of nitrogen, phosphorus and potassium. In: WRIGHT, M.J., ed. Plant Adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell University, Agric. Exp. Stn., Ithaca, New York, 1976. p.163-173.

- GONDIM, G.S.; ROSÁRIO, L.B.; AGOSTINI, J.A.E.; BRITTO, D.P. S. Adubação NPK da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em solo de Linhares, ES. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 45: 22-30, 1980.
- GOYAL, S.S. & HUFFAKER, R.C. Nitrogen toxicity in plants. In: HAUCK, R.D., ed. Nitrogen in Crop Production, Madison, American Society of Agronomy, 1984. p.97-118.
- GREENWOOD, D.J.; BARNES, A.; LEAVER, T.V. Measurement and prediction of the changes in protein contents of field crops during growth. Journal of Agricultural Science, Cambridge, 91: 467-477, 1978.
- GUEDES, G.A.A.; SIQUEIRA, J.O.; SILVEIRA, V.F. Efeito do parcelamento de nitrogênio e potássio em cana-de-açúcar (cana-planta) na região de Três Pontas, Estado de Minas Gerais. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 94: 41-44, 1979.
- HAGEMAN, R.H. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. In: HAUCK, R.D., ed. Nitrogen in Crop Production, Madison American Society of Agronomy, 1984. p.67-85.
- HARDWICK, R.C. Some recent developments in growth analysis- A review. Annual of Botany, Londres, 54: 807-812, 1984.
- HILTON, H.W. & MACKENZIE, R.J. The response of varieties to amounts of applied nitrogen as measured by yield tests - 1960 to 1978. Hawaiian Sugar Planter's Association, Annual Report, 1979. Hawaii, p.22-24.
- HUMBERT, R.P. El cultivo de la caña de azucar. México, Continental, 1974. 719p.

- HUNT, R. Plant growth analysis. Studies in biology, nº 96. London, Edward Arnold, 1978. 67p.
- INGRAM, K.T. N fertilizations and irrigation effects on sugar cane growth. Hawaiian Sugar Planter's Association. Annual Report, 1982. Hawaii, 1983. p.17-19.
- INGRAM, K.T. & HILTON, H.W. Nitrogen fertilization rate versus yield. Hawaiian Sugar Planter's Association. Annual Report, 1982. Hawaii, 1983. p.16-17.
- INOJOSA, A.E. A região norte-fluminense. STAB, Piracicaba, 2:111-114, 1984.
- IRVINE, J.E. Functions of photosynthetic rates and leaf and canopy characters to sugarcane yield. Crop Science, Madison, 15: 671-676, 1975.
- IRVINE, J.E. Photosynthesis in sugarcane varieties under field conditions. Crop Science, Madison, 7: 297 - 300, 1977.
- KIEHL, J.C.; ESPIRONELO, A.; OLIVEIRA, H. Comportamento do nitrogênio no solo, aplicado à cana-de-açúcar em duas épocas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 5: 32-37, 1981.
- LEAL, J.R.; AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; ROSIELLO, R.O.P. Potencial redox e pH; variações em um solo tratado com vinhaça. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 7: 257-61, 1983.
- LEGENDRE, D.P.; VIATOR, C.; HENDERSON, M.T.C. Choice of sample size in measuring weight, length and diameter per stalk in sugar cane experiments. Sugar Bulletin, 47: 10-12, 1969.

- LEGG, B.J. Processes at the plant and crop levels. 8. Aerial environment and crop growth. In: ROSE, D.A. & CHARLES-EDWARDS, D.A., ed. Mathematics and Plant Physiology, London, Academic Press, 1981. p.129-149.
- LEWIS, O.A.M. Plant and Nitrogen. Studies in Biology n° 166, London, Edward Arnold (Publishers) Ltd, 1986. 104p.
- LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K. Destino de uréia aplicada a um solo tropical. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 2: 40-44, 1978.
- LIMA, E.; BODDEY, R.M.; DOBEREINER, J. Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ^{15}N aided nitrogen balance. Soil Biology Biochemistry, 19: 165-170, 1987.
- LOPES, C.A. Resposta da cana-de-açúcar a diferentes níveis de zinco, em presença de fósforo. Itaguaí, 1983. 79p. (Mestrado - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro).
- MACHADO, E.C. Um modelo matemático - fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar. Campinas, 1981. 115p. (Mestrado - Universidade Estadual de Campinas).
- 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, Brasília, 17: 1325-1329, 1982.
- MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R.; CAMARGO, M.B.P. e FAHL, F.I.. Relações radiométricas de uma cultura de cana-de-açúcar. Bragantia, Campinas, 44: 229-238, 1985.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL GOMES, F.; LOURY, T.; ABREU, C.P.; VALSECCHI, O.; HAAG, H.P.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; MELLO, F.A.F.; ARZOLLA, J.O.P.; ARZOLLA, S.; RANZANI, G.; KIEHL, E.J.; CROCOMO, O.J.; MENARD, L.N.; NOVAES, R.F.; FREIRE, O.; OLIVEIRA, E.R. A diagnose foliar da cana-de-açúcar. IV. Resultados de 40 ensaios fatoriais NPK 3x3x3 primeiro corte no Estado de São Paulo, São Paulo, 1963. 47p.

MALAVOLTA, E. & HAAG, H.P. Nutrição e adubação. In: Instituto Brasileiro de Potassa, Ed. Cultura e Adubação da cana-de-açúcar. São Paulo, Editora Peri Ltda., 1964. 368 p.

MANHÃES, M.S.; AZEREDO, D.F.; PEIXOTO, A.A. Adubação NPK em cana-de-açúcar na Zona da Mata de Minas Gerais. Brasil Açucareiro, 91: 20-25, 1978.

MANIERO, M.A. Aplicação do método de graus-dia em cana-de-açúcar. Piracicaba, 1980. 76p. (Mestrado - Universidade de São Paulo).

MANZATTO, C.V. Acumulação de matéria seca e nutrientes em quatro híbridos de milho (*Zea mays* L.). Itaguaí, 1987. (Mestrado - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro).

MARINHO, M.L.; CAVALCANTI, G.A.; AMORIM, A. de L.C. Influência do nitrogênio, fósforo e potássio no rendimento industrial dos canaviais de Alagoas. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 86: 19-29, 1975.

MARZOLA, D.L. Effects of stillage application on cane and yields and juice quality. Honolulu, 1984. 179p. (Doutorado - University of Hawaii).

- McCOLL, D. Growth and sugar accumulation of sugarcane. I. Percentage of sugar in relation to pattern of growth. Experimental Agriculture, Trinidad, 12: 368-377, 1976.
- MEADE, G.P. Cane Sugar Handbook. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 4: 83-8, 1980.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plants nutrition. Switzerland, International Potash Institute Bern. 1982. 655p.
- MONGELARD, J.C. & MINURA, L. Growth studies on the sugarcane plant. I. Effects of temperature. Crop Science, Madison, 11: 795-800, 1971.
- MONSI, M. & SAEKI, T. Über den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die stoffproduktion. Jap. Journal Botany, Tóquio, 14: 22-52, 1953.
- MONTEITH, J.L. Light interception and radiative exchanges in crop stands. In: EASTIN, J.D.; HASKINS, F.A.; SULLIVAN, C.J. & VAN BAUVEL, C.H.M., eds. Physiological aspects of crop yield, Madison, American Society of Agronomy, 1969. p.89-111.
- MONTELI, A.C. Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 75: 49-52, 1970.

- NEVES, M.C.P.; DAY, J.M.; CARNEIRO, A.M. & DÖBEREINER, J. Atividade da nitrogenase na rizosfera de gramíneas tropicais forrageiras. Revista Microbiologia, São Paulo, 7: 59 - 65, 1976.
- NICKELL, L.G. Ecophysiology of sugar-cane. In: ALVIM, P.T., Coord. Ecophysiology of Tropical Crops. Manaus, CEPLAC, 1975. p.1-52.
- NYE, P.H. & TINKER, P.B. Solute movement in the soil - root system. Studies in Ecology, volume 4. London, Blackwell Scientific Publications, 1977. 342p.
- ORLANDO Fº, J.; ZAMBELLO JUNIOR, E.; SOUSA, J.A.G.C. Adubação nitrogenada em 4 variedades de cana-planta em solo Latossol Vermelho escuro-orto. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, (4): 6-14, 1977.
- ORLANDO Fº, J.; HAAG, H.P.; ZAMBELLO, E. Jr. Crescimento e absorção de macronutrientes pela cana-de-açúcar, variedade CB 41-76 em função da idade em solos do Estado de São Paulo. Boletim Técnico PLANALSUCAR, Piracicaba, 2: 1-128, 1980.
- ORLANDO Fº, J.; ZAMBELLO Jr., E.; LEME, E.J.A. Efeito da irrigação sobre a adubação NPK em cana-planta, var. CB-41-76. Boletim Técnico PLANALSUCAR, Piracicaba, 2: 31-50, 1980.
- ORLANDO Fº, J. & ZAMBELLO Jr., E. Distribuição e conservação dos solos com cana-de-açúcar no Brasil. In: ORLANDO Fº, J., Coord. Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar no Brasil, Piracicaba. Coleção PLANALSUCAR Nº 2, 1983a. p.41-43.

ORLANDO Fº, J. & ZAMBELLO Jr., E. Diagnosse foliar. In: ORLANDO Fº, J., Coord. Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba. Coleção PLANALSUCAR, nº 2, 1983b. p.125-152.

PEIXOTO, A.A. Alguns resultados de adubação em solos de aluvião no Estado do Rio de Janeiro. Brasil Acucareiro, Rio de Janeiro, 76: 53-58, 1970.

PEIXOTO, A.A. Considerações gerais sobre adubação na região canavieira do Estado do Rio de Janeiro. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, 80: 37-43, 1972.

PEIXOTO, T.C. & RICCI Jr., A. Amostra mínima representativa para caracterização da variabilidade expressa na descendência de progenitores de cana-de-açúcar. Boletim Técnico COPERSUCAR, Piracicaba, 28: 27-30, 1984.

PENNA, M.J.; CHALITA, R.; MANECHINI, C.; PENATTI, C.P.; RIBEIRO, D.L.M.; FERREIRA, S.G. Parcelamento do nitrogênio e potássio na adubação da cana-de-açúcar, Boletim Técnico COPERSUCAR, Piracicaba, 36: 8-15, 1987.

PEREIRA, P.A.A.; VON BULOW, J.F.W.; NEYRA, C.A. Atividade da nitrogenase, nitrato redutase e acumulação de nitrogênio em milho braquítico *Zea mays* L. (cv. Piranão) em dois níveis de adubação nitrogenada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 2: 28-33, 1978.

PEREIRA, A.R.; BARBIERI, V.; MANIERO, M.A. Condicionamento climático da indução ao florescimento em cana-de-açúcar. STAB, Piracicaba, 4: 56-59, 1986.

- RAMOS, D.P. & CUNHA, L.H. Caracterização de solos afetados por sais em condições não hidromórficas da região de Campos (RJ). Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 9: 155-159, 1985.
- REIS, E.L. & CABALA-ROSAND, P. Resposta da cana-de-açúcar ao nitrogênio, fósforo e potássio em solo de tabuleiro do Sul da Bahia. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 10: 129-134, 1986.
- RIBEIRO, M.R.; HALSTEAD, E.H.; JONG, E. de. Rendimento da cana-de-açúcar e características das terras da microregião da Mata Norte de Pernambuco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 8: 209-213, 1984.
- ROA, N.V.M. & MARASINHAM, V. Some aspects of nitrogen nutrition of sugarcane in Andhra. International Society Sugar Cane Technology, 9: 74-91, 1956.
- ROBINSON, D. Limits to nutrient inflow rates in roots and root systems. Physiology Plantarum, Copenhagen, 68: 551-559, 1986.
- RODELLA, A.A. Métodos de análise de solo, tecido vegetal, vinhaça e torta de filtro. In: ORLANDO Fº, J.; Coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, Coleção Planalsucar nº 2, 1983. p.351-368.
- RODRIGUES, M.B. ' KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após emprego de uréia em diferentes doses e modos de aplicação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 10: 37-43, 1986.

ROSSIELLO, R.O.P.; FERNANDES, M.S.; FLORES, J.P.O. Efeitos da deficiência hídrica sobre o crescimento e acumulação de carboidratos solúveis de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 16: 561-6, 1981.

ROSSIELLO, R.O.P.; MARZOLA, D.L.; SILVA, E.V.B. da; FERNANDES, M.S. Acumulação de matéria seca e índice da área foliar em relação à produção de cana-de-açúcar. Arquivos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 6: 107-118, 1983.

RUSCHEL, A.P. Perspectives on biological nitrogen fixation in sugar cane. In: GRAHAM, P.H. & HARRIS, S.C., eds. Biological nitrogen fixation for tropical agriculture, Cali, Columbia, Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1982.. p.497-502.

RUSCHEL, A.P. Fixação associativa de nitrogênio em cana-de-açúcar. In: Seminário de Biotecnologia Agrícola, 2º. Anais. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1984. p.35-38.

RUSCHEL, A.P. & VOSE, P.B. Nitrogen cycling in sugarcane. Plant and Soil, The Hague, 67: 139-146, 1982.

RUSSEL, R.S. Plant root system: their function and interaction with the soil. MacGraw-Hill, London, 1977. p.62-89.

SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. II. Deslocamento vertical e horizontal de NO_3 e $\text{NH}_4\text{-N}$ no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 19: 1103-08, 1984.

- SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; ALVES, G.D. Mineralização do carbono e do nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 9: 33-8, 1985.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência na utilização de uréia (^{15}N) em aplicação única ou parcelada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 19: 943-49, 1984.
- SAMUELS, G.; CAPÓ, B.G.; BANGDIWALA, I.S. The nitrogen content of sugarcane as influenced by moisture and age. The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico, Rio Piedras, 37: 1-12, 1953.
- SCHRADER, L.E. Functions and translocations of nitrogen in higher plants. In: HAUKE, R.D., ed. Nitrogen in Crop Production. Madison, 1984. p.55-65.
- SHIH, S.F. & GASCHO, G.J. Relationships among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane. Agronomy Journal, Madison, 72: 309-313, 1980.
- SHUURMAN, J.J. & GOEDEWAAGEN, M.A.J. Methods for the examination of root systems. Wageningen: Pudoc 2nd. ed., 1971.
- SILVA, L.C.F. & CASAGRANDE, J.C. Nutrição mineral de cana-de-açúcar (macronutrientes). In: ORLANDO Fº, J., Coord., Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, Coleção Planalsucar nº 2, 1983. p.77-99.
- SILVEIRA, J.A.G. Interações entre assimilação de nitrogênio e o crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) cultivada em condições de campo. Piracicaba, 1985. 152p. (Doutorado- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz/USP).

- SILVEIRA, J.A.G.; OCHOA, N.A.; CROCOMO, O.J. Fisiologia e bioquímica da nutrição da cana-de-açúcar. In: Seminário de Biotecnologia Agrícola, 2º. Anais. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1984. p.19-22.
- SOBRAL, A.F. de & LIRA, L.J. de A. Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar no Nordeste do Brasil. STAB, Piracicaba, 1: 29-33, 1983.
- SOUSA, I.C.; LEME, E.J.A.; ROSENFELD, U.; BATISTELLA, J.R.; BARBIERI, V. Irrigação da cana-de-açúcar na Região Norte Fluminense. Boletim Técnico, Planalsucar, Piracicaba, 2: 1.34, 1980.
- STANFORD, G. & AYRES, L. The internal nitrogen requirement of sugarcane. Soil Science, Madison, 98: 338-44, 1964.
- TAKAHASHI, D.T. Effect of amount and timing of the rate of fertilizer nitrogen in lysimeter studies with N¹⁵. Hawaiian Planter's Record, Honolulu, 57: 292-309, 1967.
- TAKAHASHI, D.T. Fate of ammonium and nitrate fertilizers in lysimeter studies with N¹⁵. Hawaiian Planter's Record, Honolulu, 58: 1-11, 1969.
- TANIMOTO, T. The press method of cane analysis. Hawaiian Planter's Record, Honolulu, 57: 133-154m 1964.
- TEIXEIRA, N.T. & COBRA NETTO, A. Comportamento do N total e "solúvel" em folhas da cultura da cana-de-açúcar. Ecossistema, Espírito Santo do Pinhal, 4: 51-62, 1979.
- THORNLEY, J.H.M. Mathematical models in plant physiology. A quantitative approach to problems in plant and crop physiology. Londres, Academic Press, 1976. 318p.

- TOLEDO, F.F. & NOVAIS, R.F. Cana-de-açúcar: adubação nitrogenada em cobertura. Revista de Agricultura, Piracicaba, 37 107-112, 1962.
- TOVEY, D.A.; GLASZIOU, K.T.; FARQUHAR, R.H.; BULL, T.A. Variability in radiation received by small plots of sugarcane due to differences in canopy heights. Crop Science, Madison, 13: 240-242, 1973.
- VALDIVIA, S. Nitrogen gains and losses in sugarcane (*Saccharum* sp.) agroecosystems on the coast of Peru. Plant and Soil, The Hague, 67: 147-156, 1982.
- VELLOSO, A.C.S.; NUNES, M.R.; LEAL, J.R. Efeito da vinhaça na lixiviação de nutrientes do solo. I. Nitrato e amônio. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 17(1): 51-5, 1982.
- WALDRON, J.C.; GLASZIOU, K.T.; BULL, T.A. The physiology of sugarcane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. Australian Journal Biology Science, Melbourne, 20: 1043-52, 1967.
- WARREN WILSON, J. Analysis of growth, photosynthesis and light interception for single plants and stands. Annual Botany, Londres, 48: 507-512, 1981.
- WILHELM, W.W.; MIELKE, L.N.; FENSTER, C.R. Root development of winter wheat as related to tillage practice in Western Nebraska. Agronomy Journal, Madison, 74: 85-88, 1982.
- YADAV, R.L. & SHARMA, R.K. Effect of nitrogen application to the plant crop of sugarcane on the yield and quality of the subsequent ratoon crop. Indian Journal Agriculture Science, Uttar Pradesh, 53: 38-43, 1983.

YOON, C.N. Growth studies on sugarcane. I. Dry matter production. The Malaysian Agricultural Journal, Kuala Lumpur, 40: 47-59, 1971.

ZAMBELLO Jr., E. & ORLANDO Fº, J. Adubação da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Boletim Técnico Planalsucar, Piracicaba, 3: 5-26, 1981.

ZAMBELLO Jr., E. & AZEREDO, D.F. Adubação na região Centro-Sul. In: ORLANDO Fº, J., Coord. Nutrição e Adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, Coleção PLANALSUCAR nº 2, 1983. p.289-313.