

SEÇÃO III - BIOLOGIA DO SOLO

MINERALIZAÇÃO DO C E DO N EM AMOSTRAS ARMAZENADAS DE SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR, AO LONGO DE DEZ ANOS, COM E SEM FERTILIZAÇÃO NITROGENADA⁽¹⁾

A. M. S. ARAÚJO⁽²⁾, E. V. S. B. SAMPAIO⁽³⁾ & I. H. SALCEDO⁽³⁾

RESUMO

As taxas de mineralização do C e do N foram estimadas em amostras de um Podzólico Vermelho-Amarelo latossólico álico textura arenosa, retiradas nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, ao longo dos 10 anos de um experimento de campo com cana-de-açúcar, de parcelas com e sem fertilização nitrogenada (60 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia). A mineralização do N foi medida por meio da técnica de incubação com percolação periódica e a do C pela quantidade de C-CO₂ absorvida em solução de NaOH 1 mol L⁻¹, por titulação potenciométrica. Em geral, apenas na camada superficial, o N total mineralizado acumulado durante as 20 semanas de incubação foi maior, 13% a mais no tratamento fertilizado que no não fertilizado. Entre épocas de amostragem, ao longo dos 10 anos, dentro de cada tratamento, houve diferenças significativas nas três profundidades. No entanto, as épocas de maiores mineralizações não foram as mesmas para todas as profundidades e tratamentos e não mostraram nenhuma tendência mais consistente. O C total mineralizado não diferiu significativamente entre os tratamentos (fertilizado e não fertilizado). As curvas de mineralização de C seguiram uma tendência mais linear que as do N, indicando uma possível estabilização nas taxas de mineralização entre 8 e 20 semanas. Os valores de produção média de C e N mineralizados foram de 611 e 26, 411 e 17 e 427 e 15 mg kg⁻¹ de solo, para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. O resultado mais importante foi a manutenção do potencial de mineralização de N do solo ao longo dos 10 anos de cultivo com cana, mesmo nas amostras provenientes das parcelas sem fertilização.

Termos de indexação: profundidade do solo, adubação de N, incubação, tempo de cultivo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, defendida junto à Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Recebido para publicação em dezembro de 1998 e aprovado em outubro de 2000.

⁽²⁾ Professor do Curso de Agronomia no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA. Caixa Postal 09, CEP 65000-000 São Luís (MA).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Av. Luiz Freire 1000. CEP 50740-540 Recife (PE).

SUMMARY: *CARBON AND NITROGEN MINERALIZATION IN STORED SAMPLES OF SOIL PLANTED WITH SUGARCANE, WITH AND WITHOUT N FERTILIZATION, OVER TEN YEARS*

Carbon and nitrogen mineralization rates were determined in samples from a sandy latosolic Red Yellow Podzolic soil, taken at three depths, 0-20, 20-40 and 40-60 cm, during 10 years of sugarcane cultivation, using plots with and without N fertilization (60 kg ha⁻¹ of N, as urea). N mineralization was measured using the incubation - percolation technique and C mineralization by absorbing the C-CO₂ in 1 mol L⁻¹ NaOH. Overall, N mineralization was higher (13%) in the treatment with N fertilization than in that without fertilization during the 20 weeks at the 0-20 cm layer of incubation. There were significant differences among sampling periods over the 10 years of cultivation in all three sampling depths. However, the periods with highest mineralization were not the same for all depths and treatments and did not show any consistent trend. C mineralization was not significantly different between fertilizer treatments. C mineralization curves were more linear than those for N in the last weeks of incubation, suggesting that the mineralization rates stabilized between 8 and 20 weeks. Average mineral C and N produced were 611 and 26, 411 and 17 and 427 and 15 mg kg⁻¹ soil for the depths 0-20, 20-40 and 40-60 cm, respectively. There was no reduction of the N mineralization potential during the period of sugarcane cultivation, even in samples from plots which had not received any N fertilization over that period.

Index terms: soil depth, N fertilization, incubation, cultivation time.

INTRODUÇÃO

No Brasil, diversos trabalhos com N em cana-de-açúcar têm sido feitos (Espironelo et al., 1977; Kinjo et al., 1978; Cavalcanti et al., 1979; Kiehl et al., 1981; Lima Jr., 1982; Salcedo & Sampaio, 1984; Sampaio et al., 1984; Salcedo et al., 1985; Fraga, 1989; Gomes Jr., 1992). Sabe-se que a cana retira, anualmente, grandes quantidades de N do solo (150 a 250 kg ha⁻¹) e que os solos, de maneira geral, por serem pobres em N total, recebem fertilizantes nitrogenados. Entretanto, a resposta da cana à fertilização nitrogenada tem sido quase sempre baixa, especialmente na cana-planta.

Recentemente, Korndorfer et al. (1997) observaram resposta à adubação nitrogenada em cana-planta, com aumento na produtividade agrícola em torno de 40 t ha⁻¹, contrariando o que, normalmente, é observado na literatura (Carnaúba, 1990), na qual, praticamente, não se recomenda a adubação nitrogenada para cana-planta por falta de resposta. Além disso, não obstante a pobreza dos solos, tem sido possível obter boas produtividades (70 a 80 t ha⁻¹ de cana) sem uso de N e durante muitos anos de cultivo (Azeredo & Bolsanello, 1980; Azeredo et al., 1980; Malavolta et al., 1981; Albuquerque & Marinho, 1983; Zambello & Azeredo, 1983; Sampaio et al., 1984).

Esse comportamento tem sido estudado por diversos autores, constatando-se, que durante o período de pousio do solo, entre a colheita da última

soca e o novo plantio, ocorre uma acumulação do N-mineral no perfil do solo em quantidades que variam em função de diversos fatores, tais como intensidades das chuvas, tipo de solo e outros (Kiehl et al., 1981; Salcedo & Sampaio, 1984).

No entanto, essas quantidades representam apenas pequena parcela do N que é absorvido pela cultura, e a mineralização do N-orgânico ao longo do ciclo da cana tem sido apontado como a principal fonte de N para a cana-de-açúcar (Salcedo et al., 1985). Segundo Salcedo & Sampaio (1984), o fato de a cana-soca apresentar respostas mais frequentes pode ser devido, não só à redução no teor do N mineral no perfil ao final do ciclo da cana-planta, mas também à possível queda na taxa de mineralização do N-orgânico com o decorrer do ciclo da cana, causada pelo esgotamento das fontes de C facilmente mineralizáveis, já que a dinâmica do N está estreitamente relacionada com a do C.

Zambello Jr. & Orlando Filho (1981) observaram que para a cana-planta há operações de preparo de solo que aumentam a aeração do solo, coincidindo com a elevação da temperatura e da umidade. Esses fatores influem no aumento da atividade dos microrganismos do solo, na decomposição rápida dos restos da cultura e na diminuição da relação C/N, proporcionando, assim, maior quantidade de N disponível para a cana-de-açúcar por ocasião do seu plantio.

Para diversos autores, esta cultura pode-se beneficiar do N proporcionado pela fixação de N₂

(Döbereiner, 1988), o que poderia explicar, em parte, a baixa resposta da cana à adubação nitrogenada no Brasil e o cultivo, sem adubação, com boas produções, até por mais de trinta anos.

Em Pernambuco, uma pesquisa abrangente da dinâmica de N nesta cultura vem sendo feita ao longo de dez anos (Sampaio et al., 1984). Em experimento de campo, não se têm obtido respostas. No entanto, admitindo que a cana vem utilizando o N do solo, é possível que tenha ocorrido uma queda no seu potencial de mineralização.

O objetivo deste trabalho foi verificar as tendências no potencial de mineralização de N, ao longo dos dez anos de cultivo desse solo com cana-de-açúcar, utilizando fertilização nitrogenada.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de um Podzólico Vermelho-Amarelo latossólico álico textura arenosa, proveniente de um experimento de campo com cana-de-açúcar, variedade Co997, instalado na Unidade Experimental de Itapirema em Goiana (PE), pertencente à Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA), iniciado em outubro de 1981 (Sampaio et al., 1984; Salcedo et al., 1985; Lemos et al., 1988). Essas amostras foram retiradas de parcelas sem (T) e com fertilização nitrogenada (F), 60 kg ha⁻¹ de N, com quatro repetições, ao longo de 10 anos de cultivo, correspondendo a dois plantios consecutivos com cana-de-açúcar, cada um com quatro períodos, de cana-planta e três socas.

Entre um plantio e outro, o campo permaneceu em pousio durante dez meses (Sampaio, 1991). A adubação foi feita com uréia, em fundação nos plantios e em cobertura nas socas. Na época da colheita da cana, em cada período, foram retiradas, com trado, três amostras de solo por parcela de cada uma das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, que foram misturadas para obter uma amostra composta, por parcela e por profundidade. As amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas por malha de 2 mm e guardadas em recipientes plásticos, mantidos no depósito de solos do DEN-UFPE, com temperatura e umidade do ar ambientes. Em subamostras, foram feitas análises físicas e químicas (Quadro 1), tendo sido as umidades determinadas a 33 kPa, o pH em água (1:2,5) e o fósforo com Mehlich-1.

Seis meses antes do início do experimento de campo, em 1981, foi aplicada na área experimental dose equivalente a uma tonelada de calcário dolomítico, misturada aos 15 cm superficiais do solo. Todas as parcelas receberam 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfósforo simples) e 100 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio), no sulco de plantio e em cobertura em todas as socas (Sampaio, 1991).

Com as amostras retiradas na cana-planta e na 3ª soca do primeiro plantio e na cana-planta, 1ª, 2ª e 3ª socas do segundo plantio (1, 4, 7, 8, 9 e 10 anos após o início do experimento, em 1981), foram realizados dois experimentos consecutivos em casa de vegetação. No primeiro, usaram-se amostras da profundidade de 0-20 cm, com um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 6 x 2 (6 épocas de amostragem x 2 tratamentos, T e F), com 4 repetições. No segundo experimento, também em delineamento inteiramente casualizado e com 4 repetições, o fatorial foi 4 x 2 x 2 (4 épocas de amostragem x 2 tratamentos x 2 profundidades). As épocas utilizadas corresponderam aos anos de 1982 e 1985 (início e final do primeiro plantio), 1988 e 1991 (início e final do segundo plantio) e as profundidades 20-40 e 40-60 cm. As temperaturas, na casa de vegetação, variaram bastante ao longo do dia, de um mínimo de 22 a um máximo de 35°C, mas a faixa de variação oscilou pouco durante o período dos experimentos.

Para avaliar a mineralização do N-orgânico, utilizou-se a técnica de Stanford & Smith (1972), com modificações (Alves, 1989). Amostras de 50 g de solo foram misturadas com diferentes quantidades de areia lavada e peneirada (Lueking & Shepers, 1986) e colocadas em colunas de percolação construídas com tubos de PVC (4 cm de diâmetro por 30 cm de altura). O N mineral inicialmente presente nas amostras foi removido por percolação com 100 ml de CaCl₂.2H₂O 0,01 mol L⁻¹, aplicados em frações de 20 ml, e, em seguida, pela adição de 50 ml (duas alíquotas de 25 ml) de uma solução nutritiva destituída de nitrogênio (CaSO₄.2H₂O 0,001 mol L⁻¹; MgSO₄ 0,002 mol L⁻¹ e KH₂PO₄ 0,005 mol L⁻¹). O excesso de solução no solo (extratora e nutritiva) foi removido por vácuo (3,3 kPa), aplicado à extremidade inferior do percolador. Na parte superior, foi colocado um recipiente de vidro que continha 10 ml de NaOH 1 mol L⁻¹, para absorção do CO₂ desprendido durante a incubação, fechando-se imediatamente ambas as extremidades do percolador para não absorver o CO₂ ambiental.

Após uma semana, os percoladores foram abertos, o N mineral removido por lixiviação com 100 ml de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e as colunas percoladas novamente com solução nutritiva, seguindo-se a aplicação do vácuo, conforme descrito. As soluções de NaOH 1 mol L⁻¹ dos recipientes foram trocadas e os percoladores fechados novamente. Toda esta operação foi repetida por períodos consecutivos de 1, 1, 1, 1, 2, 2, 4, 4 e 4 semanas, totalizando 20 semanas de incubação, em cada um dos experimentos. Em cada experimento, dois percoladores que continham apenas areia lavada (100 g) serviram como brancos.

Para a determinação do N mineralizado, utilizaram-se 100 ml do percolado, passando-os por filtro milipore (0,45 µm), para retirar as partículas em suspensão, e analisaram-se os teores de N-NH₄⁺

Quadro 1. Médias globais das características físicas e químicas de amostras, retiradas das profundidades (prof.) de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, de um Podzólico Vermelho-Amarelo latossólico álico, em diferentes épocas após o início do cultivo com cana-de-açúcar

Profundidade	Densidade global	Capacidade de campo	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	K ⁺	P	C	N
cm	g cm ⁻³	g kg ⁻¹		mmol. kg ⁻¹				mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹	
0-20	1,56	57	5,2	5,0	1,0	3,0	0,5	4,2	7	0,6
20-40	1,59	72	5,0	2,3	0,5	4,5	0,1	0,6	4	0,4
40-60	1,55	108	5,1	2,0	0,4	4,3	0,1	0,2	3	0,3

e de N-NO₃⁻, por colorimetria, em um auto-analisador Technicon AAI (EPA, 1971). A quantidade de C-CO₂ na solução do NaOH foi determinada potenciométricamente por titulação com HCl 0,05 mol L⁻¹ no intervalo de pH de 8,3 a 3,7, segundo método descrito por Sampaio & Salcedo (1982).

Os resultados acumulados para C e N mineralizados, em cada experimento e para cada profundidade, foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 1%.

Os valores acumulados do N-(NH₄⁺ + NO₃⁻) mineralizado durante as 20 semanas de incubação foram ajustados a três modelos matemáticos por progressão não-linear, pelo método dos mínimos quadrados, empregando o sistema de análise estatístico SAS (1982).

O primeiro ajuste foi feito utilizando-se a função que define as reações cinéticas de primeira ordem, do modelo exponencial simples (Stanford & Smith, 1972). Tal modelo considera um único reservatório de N no solo, definido pela equação: $N_t = N_0(1 - e^{-kt})$, sendo N₀ o N potencialmente mineralizável, N_t o N mineralizado no tempo t, e k a constante de mineralização.

O segundo modelo é definido por uma exponencial dupla (Molina et al., 1980), que considera dois reservatórios de nitrogênio no solo, descrito pela equação: $N_t = N_{01}(1 - e^{-h_1t}) + N_{02}(1 - e^{-k_2t})$, em que N₀₁ e N₀₂ são as quantidades de N potencialmente mineralizáveis, presentes nas frações de mais rápida e de mais lenta mineralização, respectivamente, e h e k são as constantes de mineralização para estas duas frações.

O terceiro modelo empregado, correspondendo a um modelo misto (Seyfried & Rao, 1988), é definido pela combinação dos modelos que definem uma cinética de primeira-ordem e uma de zero-ordem, que não leva em consideração a quantidade de substrato inicial. É descrito pela seguinte equação: $N_t = N_0(1 - e^{-ht}) + kt$, em que N₀ é o N potencialmente

mineralizado numa fração mais lábil, N_t é o N total mineralizado no tempo t, e h e k, as constantes de mineralização.

A escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados foi baseada no cálculo do menor desvio-padrão (s) (RQME), uma vez que o critério de usar o maior R² não parece ser o mais conveniente, pois geralmente esses modelos têm valores de R² muito semelhantes e próximos de 1 (Ellert & Bettany, 1988).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, houve diferenças significativas entre épocas de amostragem quanto às quantidades totais de C e N mineralizados nas 20 semanas de incubação, enquanto as diferenças entre tratamentos com e sem fertilização só foram significativas para o N (Quadro 2). A interação das épocas de amostragem e os tratamentos com e sem fertilizante nitrogenado mostrou que existiram poucas diferenças entre tratamento para as diversas épocas (Quadro 2). Os valores de C e N mineralizados foram mais altos nas amostras da camada de 0-20 cm que nas de 20-40 e 40-60 cm (embora sem análise estatística). Isto coincide com resultados obtidos anteriormente por outros autores (Lima Jr., 1982; Salcedo et al., 1985; Lemos, 1986; Alves, 1989; Fraga, 1989) e se justifica pela maior quantidade de matéria orgânica na camada superficial, resultando em maior atividade metabólica dos microrganismos nessa camada.

Nas amostras retiradas da camada de 0-20 cm e provenientes das parcelas que receberam fertilização, o N mineralizado acumulado durante as 20 semanas de incubação foi significativamente maior (27,4 mg kg⁻¹ de solo) que o das amostras não fertilizadas (24,2 mg kg⁻¹ de solo), embora com uma diferença de apenas 13%. A produção média de C mineralizado nessa camada foi de 611 mg kg⁻¹ de solo, variando de 541 a 665 mg kg⁻¹ de solo e de 562

Quadro 2. Mineralização acumulada de N ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) e de C (CO_2) e relação do C e N mineralizados, em 20 semanas de incubação, em amostras, retiradas das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, de um Podzólico Vermelho-Amarelo latossólico álico, em diferentes épocas após o início do cultivo com cana-de-açúcar, sem e com fertilização nitrogenada (60 kg ha^{-1} de N). Resultados de dois experimentos, um com as amostras de 0-20 cm e outro com as de 20-40 e 40-60 cm

Plantio	Época	Com N		Sem N		C:N	
		N	C	N	C	Com N	Sem N
	ano	mg kg ⁻¹					
0-20 cm, experimento 1							
Plantio 1	1	24,3 aC	562 aAB	22,3 aA	542 aA	23,1	24,3
3ª Soca	4	25,6 aBC	518 bB	22,5 aA	679 aA	20,3	30,2
Plantio 2	7	32,3 aAB	605 aAB	26,3 bA	615 aA	17,4	23,4
1ª Soca	8	23,9 aC	599 aAB	25,7 aA	589 aA	25,0	22,9
2ª Soca	9	24,8 aC	620 aAB	23,3 aA	616 aA	25,0	26,4
3ª Soca	10	33,6 aA	719 aA	25,3 bA	665 aA	21,4	26,3
Média		27,4 a	604 a	24,2 b	618 a	22,0	25,5
20-40 cm, experimento 2							
Plantio 1	1	14,9 aAB	372 aAB	15,87 aA	406 aAB	24,9	25,6
3ª Soca	4	14,3 aB	365 aB	15,48 aA	405 aAB	25,5	26,1
Plantio 2	7	18,6 aAB	427 aAB	18,04 aA	375 aB	22,9	20,8
3ª Soca	10	20,2 aA	459 aA	18,96 aA	480 aA	22,7	25,3
Média		17,0 a	406 a	17,09 a	417 a	23,8	24,4
40-60 cm, experimento 2							
Plantio 1	1	9,1 aB	425 aA	11,71 aB	398 aA	46,5	33,9
3ª Soca	4	15,3 bA	411 aA	18,71 aA	449 aA	26,8	24,0
Plantio 2	7	18,0 aA	452 aA	20,49 aA	451 aA	25,0	22,0
3ª Soca	10	16,8 aA	428 aA	12,89 bB	404 aA	25,5	31,4
Média		14,8 a	429 a	15,95 a	426 a	28,9	26,7

Médias, na mesma linha, para N e C separadamente, seguidas por letras minúsculas iguais e, na mesma coluna, para cada profundidade, seguidas por letras maiúsculas iguais, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey, a 1%.

a 719 mg kg^{-1} de solo para os tratamentos sem e com fertilização (Quadro 2). Esses valores foram maiores que os encontrados por Salcedo et al. (1985), em amostras desse mesmo solo e camada, incubadas por 11 semanas (280 mg kg^{-1} de solo). A explicação deve estar na maior temperatura de incubação neste trabalho (em casa de vegetação), oscilando entre 22 e 35°C ao longo do dia, contra $26 \pm 2^\circ\text{C}$ na incubação em laboratório do trabalho anterior. Vários trabalhos têm demonstrado este efeito da temperatura e permitido calcular coeficientes de temperatura (Stanford et al., 1973; 1975; Cassman & Munns, 1980, Campbell et al., 1981; Nira & Nishimune, 1993). Entre épocas de amostragem, nestas amostras de 0-20 cm, houve diferenças no N mineralizado apenas no tratamento com N (Figura 1).

Nas amostras retiradas das duas camadas subsuperficiais, não houve diferenças significativas entre os tratamentos, com e sem fertilizante (Quadro 2). Em termos de épocas de amostragem, o N mineralizado variou de maneira diferenciada nessas duas profundidades. Nas amostras retiradas

da profundidade de 20-40 cm, diferenças entre épocas ocorreram apenas no tratamento com fertilizante (Quadro 2), enquanto, nas amostras da profundidade de 40-60 cm, houve diferenças entre épocas de amostragem tanto das parcelas fertilizadas quanto das não fertilizadas, mas envolvendo épocas distintas em cada tratamento.

As curvas de mineralização obtidas a partir dos dados acumulados de N durante as 20 semanas de incubação (Figura 1) mostram que, para todos os tratamentos e nas três profundidades, a queda na inclinação foi regular e progressiva, até uma possível estabilização a partir da oitava semana. Kinjo et al. (1978) encontraram estabilização na produção de N a partir da 3ª e 4ª semanas, enquanto Pottker & Tedesco (1979) obtiveram estabilização entre 6 e 10 ou 10 e 14 semanas, dependendo do tipo de solo. Salcedo et al. (1985) encontraram estabilização no último subperíodo de incubação (9 a 11 semanas). As curvas de mineralização do C (Figura 2) seguiram uma tendência mais linear que as curvas de mineralização do N e, entre oito e vinte semanas,

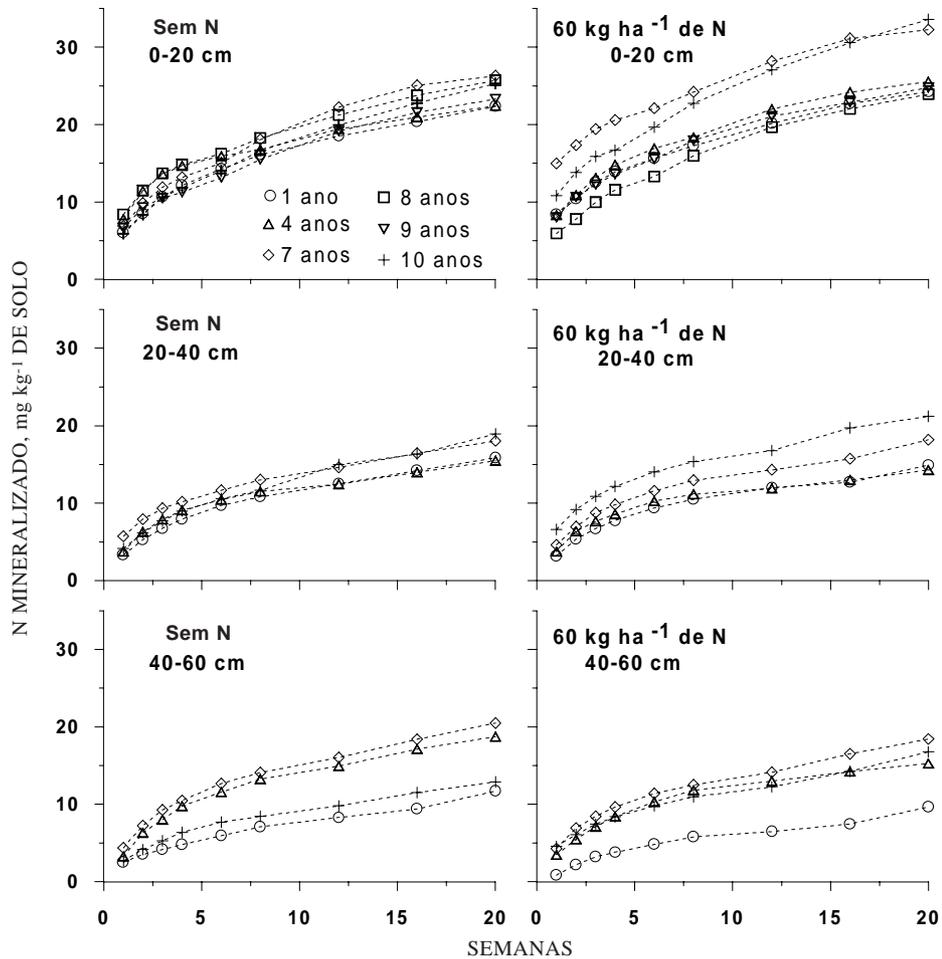


Figura 1. Mineralização acumulada de N-(NH₄⁺ + NO₃⁻) em 20 semanas de incubação, em amostras retiradas das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de um solo PVA, em diferentes épocas após o início do cultivo com cana-de-açúcar, sem N e com 60 kg ha⁻¹ de N.

quase não houve mudanças na inclinação de cada curva, indicando uma possível estabilização nas taxas de mineralização.

Para o C mineralizado, entre épocas de amostragem e dentro de cada tratamento, houve diferenças significativas apenas para as duas primeiras profundidades (Quadro 2). Na camada de 0-20 cm, assim como para o N, elas ocorreram apenas para o tratamento com fertilizante enquanto, na camada de 20-40 cm, houve diferenças para ambos os tratamentos. Os resultados obtidos com relação às épocas de amostragem não refletem o comportamento esperado, pois, no geral, as amostras retiradas nos períodos mais recentes tiveram maior mineralização que aquelas retiradas em períodos anteriores, não ocorrendo um declínio na taxa de mineralização com o tempo de cultivo do solo.

As amostras retiradas após um e quatro anos do início do cultivo (cana-planta e terceira soca do primeiro plantio) estão, geralmente, com os valores

de mineralização mais baixos. Logo, não parece ter havido queda no potencial de mineralização com o tempo de cultivo da cana. Poderia até ter havido um acréscimo. No entanto, a variação entre épocas e entre tratamentos foi pequena, e, dentro dos tratamentos, no geral, não houve diferença entre a primeira e a última amostragem.

Os períodos crescentes de armazenamento das amostras retiradas mais perto do início do cultivo, inevitáveis neste tipo de experimento, poderiam contribuir para a ausência de diferenças entre épocas. Entretanto, é pouco provável que este efeito de armazenamento de amostras secas ao ar tenha magnitude apreciável e que compense possíveis quedas no potencial de mineralização tanto do C quanto do N, no campo, nas parcelas sem adubação nitrogenada, ao longo dos dez anos de cultivo da cana.

As maiores taxas de mineralização de N e C ocorreram nas primeiras semanas de incubação, independentemente do tratamento, diminuindo,

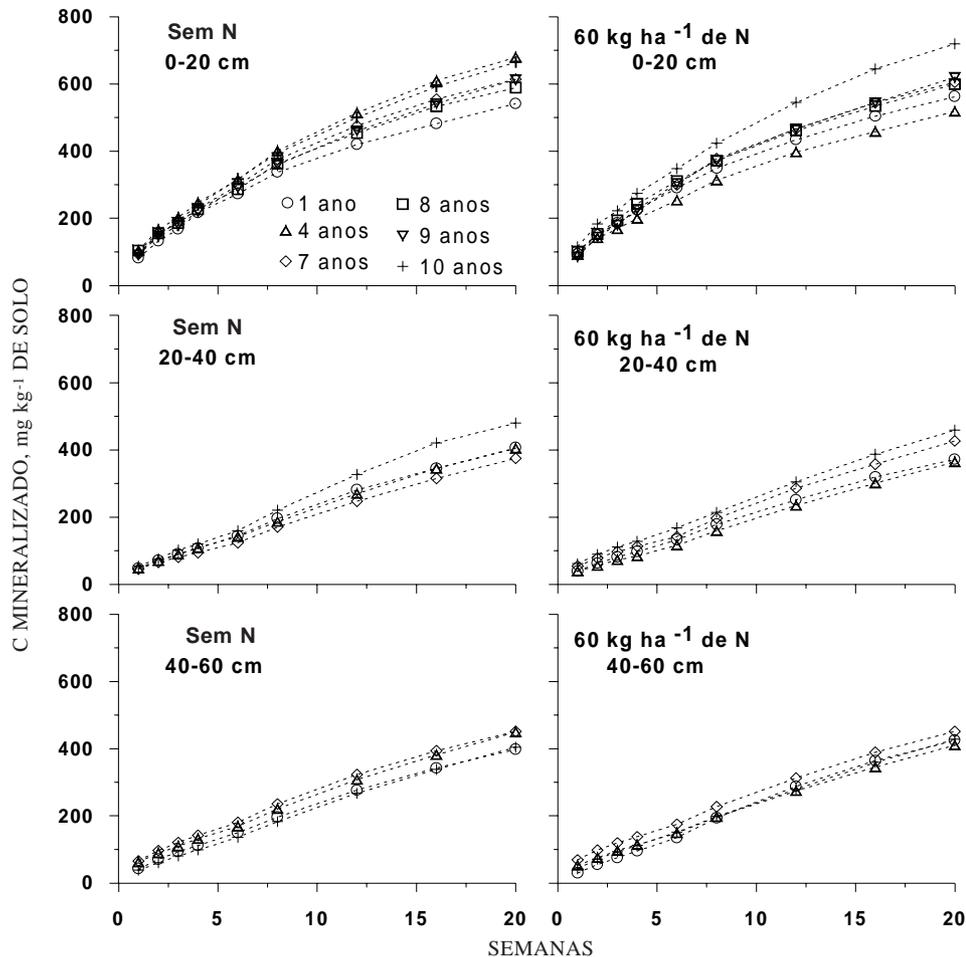


Figura 2. Mineralização acumulada de C-CO₂ em 20 semanas de incubação, em amostras retiradas das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de um solo PVA, em diferentes épocas após o início do cultivo com cana-de-açúcar, sem N e com 60 kg ha⁻¹ de N.

sensivelmente, após as três primeiras semanas. Esse comportamento pode ser explicado pelo rápido esgotamento da fração da matéria orgânica facilmente mineralizável. Segundo Pottker & Tedesco (1979), após as três semanas iniciais, ocorre uma redução das quantidades de compostos orgânicos de fácil decomposição, restando os resíduos orgânicos de alta estabilidade, provocando, assim, uma diminuição nas taxas de mineralização.

Foram encontradas altas taxas de mineralização de N e de C nos períodos iniciais, seguidos de uma diminuição gradativa, por outros autores em solos brasileiros (Kinjo et al., 1978; Pottker & Tedesco, 1979; Lima Jr., 1982; Salcedo et al., 1985; Lemos, 1986; Minihoni & Cerri, 1987; Alves, 1989). A maior taxa de produção de N ocorreu ao final da primeira semana. No geral, as produções de C-CO₂ mineralizado por semana parecem refletir as mesmas tendências do N. Nas duas primeiras semanas, a mineralização foi maior, seguida de um

decréscimo gradativo, tanto para o tratamento sem N como para o com N.

Considerando as produções isoladas de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ por semana, ao longo do tempo de incubação, percebeu-se, inicialmente, maior produção do N-NH₄⁺ para todos os tratamentos, nas três profundidades estudadas (Figura 3). Esta produção decresceu gradativamente, enquanto a de N-NO₃⁻ tendeu a aumentar, chegando a ultrapassar a do N-NH₄⁺. Em geral, esta ultrapassagem foi mais retardada nas amostras subsuperficiais.

Hadas et al. (1986) verificaram um retardo crescente na nitrificação com o aumento da profundidade das amostras, em sistema de incubação fechada, enquanto Cassman & Munns (1980) encontraram baixas quantidades de N-NH₄⁺, independentemente da profundidade, porém, trabalhando com sistema aberto. Lemos et al. (1988), trabalhando também com sistema aberto, encontraram maior proporção de N-NH₄⁺ com o aumento da profundidade.

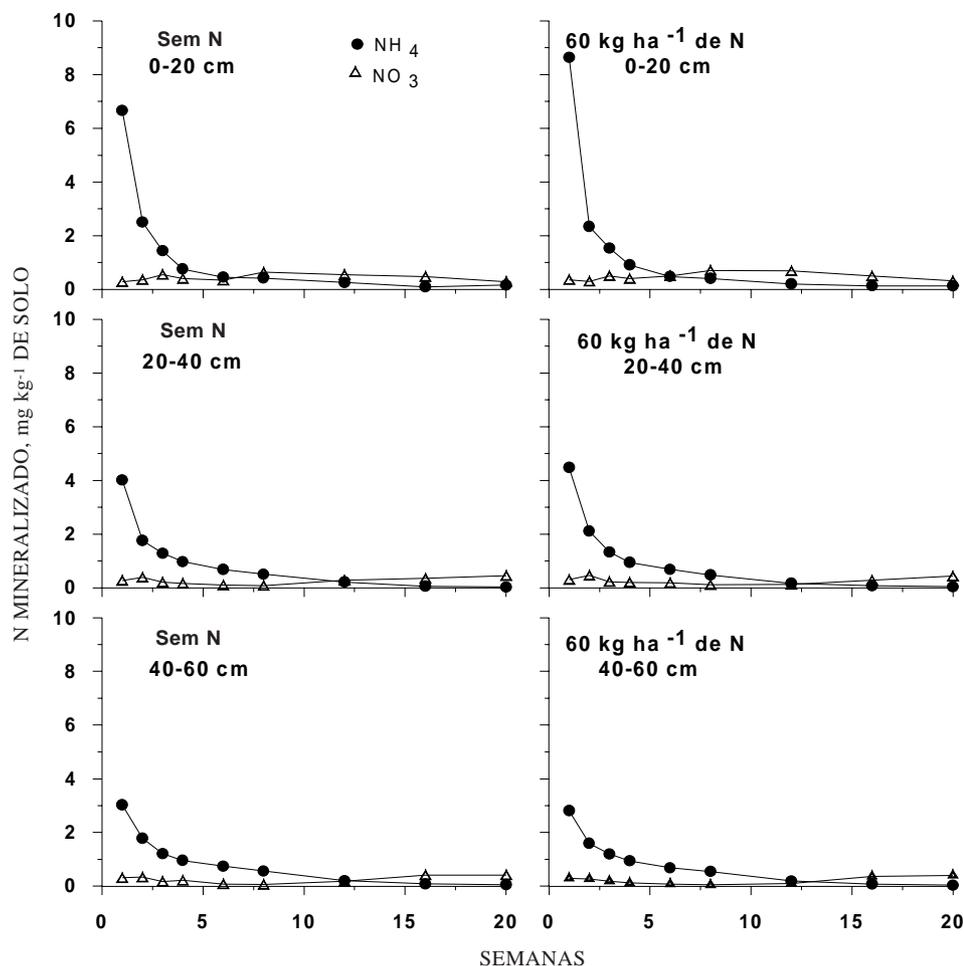


Figura 3. Produção média semanal de N- NH₄⁺ e de N- NO₃⁻ por período de incubação, em amostras retiradas das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm de um solo PVA, cultivado com cana-de-açúcar, sem N e com 60 kg ha⁻¹ de N. (médias de amostras retiradas com diferentes épocas de cultivo).

Na camada de 0-20 cm, os valores de produção de N-NH₄⁺, para o tratamento fertilizado, inicialmente foram altos, e o N-NO₃⁻ atingiu valores iniciais baixos, aumentando à medida que o N-NH₄⁺ foi sendo oxidado, o que ocorreu aproximadamente entre a sexta e a oitava semana de incubação.

Nas amostras provenientes das parcelas não fertilizadas, o N-NH₄⁺ também foi maior nas primeiras semanas, porém com valores iniciais mais baixos que os das parcelas fertilizadas. Para os dois tratamentos, nas amostras retiradas no primeiro ano após o início do experimento (cana-planta do primeiro plantio), os teores de N-NH₄⁺ permaneceram sempre mais altos que os de N-NO₃⁻ até o final das 20 semanas (dados não apresentados). É possível que as condições para a nitrificação tenham sido pouco favoráveis nesse período, não havendo tempo suficiente para o estabelecimento de uma população ativa de microrganismos nitrificantes, ficando uma baixa concentração do N-NO₃⁻ no solo, o que justificaria a

maior presença do N-NH₄⁺ durante todo o período de incubação. Elevadas proporções de N-NH₄⁺ também foram encontradas por Johnson (1979) e Johnson et al. (1990) até cinco meses depois da aplicação de adubos nitrogenados.

Nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, as produções de ambos os íons foram baixas, havendo maior permanência de N-NH₄⁺, com a profundidade, para ambos os tratamentos (Figura 3). Provavelmente, a nitrificação foi baixa por causa da pequena população de microrganismos nitrificadores nessas camadas subsuperficiais.

As médias globais de produção de N mineralizado foram de 25,9; 17,0 e 15,3 mg kg⁻¹ de solo, para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm (Quadro 2). Esses valores oscilam em torno de 4% do N total do solo, nas três profundidades consideradas.

Conhecendo o volume de solo e a densidade aparente para cada profundidade, foram calculadas

as quantidades de N, mineralizado em kg ha^{-1} , equívale a 81, 54 e 47 kg ha^{-1} de N, para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Ao final das 20 semanas de incubação, as produções médias de C mineralizado foram de 611 mg kg^{-1} de solo ($2,0 \text{ t ha}^{-1}$), 411 mg kg^{-1} de solo ($1,3 \text{ t ha}^{-1}$) e 427 mg kg^{-1} de solo ($1,3 \text{ t ha}^{-1}$), para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Estas quantidades equivalem a cerca de 9, 10 e 14% do C total, nas três profundidades.

Dos três modelos analisados, apenas o modelo misto (exponencial + linear), resultante da combinação dos modelos cinéticos de primeira-ordem (Stanford & Smith, 1972) e de zero-ordem (Seyfried & Rao, 1988), mostrou um bom ajuste aos dados (Quadro 3). O modelo exponencial simples, que considera um único reservatório de N no solo, apresentou um s (desvio-padrão) maior que os demais modelos e subestimou os valores de No, já que eles foram mais baixos que os obtidos pelo N mineralizado acumulado nas 20 semanas de incubação. O modelo baseado na equação exponencial dupla só ajustou completamente os dados referentes à profundidade de 0-20 cm. Nas demais profundidades, para a maioria das épocas, não houve convergência dos dados pelo modelo.

O modelo misto, apesar de ter sido o mais consistente, não permite que se faça nenhuma estimativa do N potencialmente mineralizável total por causa de sua função linear. O No obtido corresponde à mineralização inicial mais rápida graças à depleção da fração orgânica facilmente mineralizável, representada pela função exponencial. Depois, a taxa de mineralização passa a ser mais lenta e constante, correspondendo a uma mineralização basal, por ser a fração orgânica mais recalcitrante. Em média, os valores de No obtidos por este modelo foram maiores nas profundidades superiores e para o tratamento com N. Os valores de h variaram muito pouco entre épocas de amostragem dentro de cada tratamento. Usando este modelo, as mineralizações médias das três profundidades, calculadas para um período de um ano e para um hectare, seriam equívales a 157, 97 e 85 kg ha^{-1} de N, com um total de 339 kg ha^{-1} , um pouco inferior aos 394 kg ha^{-1} estimados por Salcedo et al. (1985), para o mesmo solo no início do cultivo da cana.

Assim como ocorreu para o No, o modelo que se mostrou mais apropriado aos dados cumulativos de C mineralizado durante as 20 semanas de incubação, proporcionando um melhor ajuste às curvas de mineralização, foi o modelo misto, embora, para algumas épocas, dentro de cada tratamento, não tenha ocorrido convergência dos dados experimentais com o modelo (dados não mostrados).

A relação de C para N mineralizado foi, em média, maior no tratamento sem N (Quadro 2), fato

Quadro 3. N potencialmente mineralizável (No) e constantes de mineralização (h e k), obtidas por ajuste de modelo exponencial + linear, após 20 semanas de incubação de amostras de um PVA, retiradas das profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, em diferentes épocas após o início de cultivo com cana-de-açúcar, sem e com fertilização nitrogenada (60 kg ha^{-1} de N)

Plantio	Época	No	h	k	s
0-20 cm, sem N					
Plantio 1	1	11,60	0,529	0,546	0,397
3ª Soca	4	13,41	0,788	0,465	0,269
Plantio 2	7	11,30	0,655	0,809	0,944
1ª Soca	8	12,79	0,849	0,681	0,416
2ª Soca	9	8,95	1,005	0,763	0,697
3ª Soca	10	10,05	0,594	0,784	0,480
Média		11,35	0,737	0,675	0,534
0-20 cm, com N					
Plantio 1	1	11,71	0,901	0,660	0,596
3ª Soca	4	13,19	0,716	0,658	0,709
Plantio 2	7	16,49	1,816	0,970	0,853
1ª Soca	8	10,80	0,448	0,743	0,955
2ª Soca	9	11,34	0,813	0,683	0,746
3ª Soca	10	13,29	1,192	1,057	0,817
Média		12,90	0,981	0,795	0,779
20-40 cm, sem N					
Plantio 1	1	7,78	0,433	0,403	0,108
3ª Soca	4	9,08	0,514	0,324	0,164
Plantio 2	7	8,55	0,752	0,460	0,240
3ª Soca	10	7,28	0,606	0,586	0,351
Média		8,17	0,576	0,443	0,216
20-40 cm, com N					
Plantio 1	1	8,18	0,483	0,346	0,290
3ª Soca	4	9,11	0,490	0,253	0,201
Plantio 2	7	10,01	0,646	0,447	0,343
3ª Soca	10	11,06	0,711	0,495	0,356
Média		9,59	0,583	0,385	0,298
40-60 cm, sem N					
Plantio 1	1	3,36	0,750	0,397	0,316
3ª Soca	4	9,84	0,351	0,421	0,182
Plantio 2	7	9,98	0,485	0,524	0,129
3ª Soca	10	5,68	0,485	0,360	0,151
Média		7,27	0,518	0,426	0,195
40-60 cm, com N					
Plantio 1	1	3,94	0,309	0,248	0,306
3ª Soca	4	10,27	0,332	0,250	0,186
Plantio 2	7	8,84	0,559	0,455	0,120
3ª Soca	10	6,67	0,823	0,892	0,327
Média		7,41	0,506	0,361	0,235

perfeitamente aceitável, uma vez que esse tratamento mineralizou menos N. No entanto, na camada de 40-60 cm, aconteceu o inverso, levando a supor que a redução no teor de N nessa camada foi muito menor que a redução do C, possivelmente em virtude da ligeira imobilização pelos microrganismos, sugerindo menor disponibilidade desse elemento nessa camada de solo. Em média, as relações C/N encontradas foram de 26, 24 e 27, para o tratamento sem N, e de 22, 24 e 29, para o tratamento com N, para as profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Esses valores foram maiores que os encontrados por Freytag & Rausch (1984) e por Salcedo et al. (1985), que obtiveram relações de C/N entre 7 e 10.

Os resultados obtidos mostram que, embora tenham ocorrido diferenças entre os tratamentos, elas foram pequenas e limitadas a algumas épocas dentro de cada profundidade, não interferindo no potencial de mineralização. A maior mineralização nas parcelas fertilizadas mostra o efeito do N aplicado, incorporando-se cumulativamente à matéria orgânica do solo. Esses resultados indicam que a cana não está usando em grande medida o N do solo. Caso estivesse, o potencial tenderia a cair, e ele se manteve, mesmo depois de o solo ter sido cultivado por dez anos consecutivos, sem fertilização.

Aparentemente, grande parte do N nas plantas veio da fixação do N atmosférico (Urquiaga et al., 1992). Isto está de acordo com a ausência de resposta na produção de cana à fertilização, observada, na maioria dos anos, no experimento de campo (Sampaio, 1991) de onde provieram as amostras deste ensaio. Aparentemente, o cultivo da cana tem mantido a matéria orgânica do solo com todo o seu potencial de mineralização, quando, geralmente, têm-se percebido uma diminuição gradativa no teor de matéria orgânica nos solos cultivados e redução do potencial de mineralização (Sampaio, 1991).

CONCLUSÕES

1. Houve maior mineralização do N nas amostras provenientes das parcelas fertilizadas, mas apenas na camada superficial.

2. Tanto para o C como para o N, houve poucas diferenças, nos totais mineralizados, entre tratamentos com e sem N, nas diferentes épocas de amostragem.

3. Não houve redução no potencial de mineralização ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar, mesmo depois de o solo ter sido cultivado por dez anos consecutivos, sem fertilização.

LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, G.A. & MARINHO, M.L. Adubação na Região Nordeste In: ORLANDO FILHO, J., coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA / PLANALSUCAR, 1983. p.265-286.
- ALVES, G.D. Mineralização de carbono e nitrogênio em 20 solos do Estado de Pernambuco e absorção de nitrogênio pelo sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench.). Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1989. 75p. (Tese de Mestrado)
- AZEREDO, D.F. & BOLSANELLO, J. Efeitos da adubação nitrogenada em cana-planta na Zona da Mata de Minas Gerais In: ENCONTRO DE TÉCNICOS LIGADOS À CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR DA ZONA DA MATA, 3, Viçosa, 1980. Viçosa, IAA / PLANALSUCAR, 1980. 10p.
- AZEREDO, D.F.; ROBAINA, A.A. & MANHÃES, M.S. Adubação mineral (N-P-K) em cana-planta nos Estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (Zona da Mata). Bras. Açuc., 95:19-28, 1980.
- CAMPBELL, C.A; MYERS, R.S.K & WEIER, K.L. Potentially mineralizable nitrogen, decomposition rates and their relationship to temperature for five Queensland soils. Aust. J. Soil Res., 19:323-332, 1981.
- CARNAÚBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. STAB - Açúcar, Alcool Subp., 8:24-41, 1990.
- CASSMAN, K.G. & MUNNS, D.N. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:1233-1237, 1980.
- CAVALCANTI, F.J.A.; FERNANDES, C.S.; GOMES, R.V.P. & MOURA, R.J.M. Lucro da adubação NPK na cana-de-açúcar em Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 3:115-120, 1979.
- DÖBEREINER, J.; REIS, V. & LAZARINI, A.C. New N₂ fixing bacteria in association with cereals and sugar cane. In: BOTHE, M.; DE BRULJN, F.J. & NEWTON, W.E., eds. Nitrogen fixation: hundred years after. Stuttgart, Gustav Fisher, 1988. p.717-722.
- ELLERT, B.H. & BETTANY, J.R. Comparison of kinetic models for describing net sulfur and nitrogen mineralization. Soil Sci. Soc. Am. J., 52:1962-1702, 1988.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Methods for chemical analysis of waters and wastes. Cincinnati, EPA, 1971. 312p.
- ESPIRONELO, A.; OLIVEIRA, H. & NAGAI, V. Efeitos da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (cana-planta) em anos consecutivos de plantio I. Resultados 1974/75 e 1975/76. R. Bras. Ci. Solo, 1:76-81, 1977.
- FRAGA, V.S. Utilização de N proveniente de uréias pela cana-de-açúcar em solos tropicais, Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1989. 127p. (Tese de Mestrado)
- FEYTAG, H.E. & RAUSCH, H. Beziehung zwischen der C - und der N - Mineralisierung der organischer Bodensubstanz. Zbl. Microbiol., 139:537-544, 1984.

- GOMES Jr., R.N. Efeito da incorporação ao solo do material vegetal produzido durante o pousio e adubação nitrogenada na dinâmica de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1992. 91p. (Tese de Mestrado)
- HADAS, A.; FEIGENBAUM, S.; FEIGIN, A. & PORTNOY, R. Nitrogen mineralization in profiles of differently managed soil types. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:314-319, 1986.
- JOHNSON, D.W.; EDWARDS, N.T. & TODD, D.E. Nitrogen mineralization, immobilization and nitrification, following urea fertilization of a forest soil under field and laboratory conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:610-616, 1980.
- JOHNSON, D.W. Some nitrogen fractions in two forest soils and their changes in response to urea fertilization. *North. Sci.*, 53:22-32, 1979.
- KIEHL, L.C.; ESPIRONELO, A. & OLIVEIRA, H. Comportamento do nitrogênio no solo, aplicado à cana-de-açúcar em duas épocas. *R. Bras. Ci. Solo*, 5:32-37, 1981.
- KINJO, T.; MARCOS, Z.Z. & JACOB, O.M. Produção de nitrato por incubação de amostras do horizonte AP de solos da região canavieira de Piracicaba. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:103-106, 1978.
- KORNDORFER, G.H.; VALLE, M.R.; MARTINS, M. & TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio da uréia pela cana-planta. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:23-26, 1997.
- LEMO, E.E.P. Mineralização do carbono e do nitrogênio em dois sistemas de incubação em solo cultivado com cana-de-açúcar. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1986. 102p. (Tese de Mestrado)
- LEMO, E.E.P.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Comparação entre o N mineralizado através de incubações com e sem percolação e o N absorvido pelo milho em solo Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:127-130, 1988.
- LIMA Jr., M. Nitrogen nutrition of sugar cane in NE Brazil. Saskatoon, University of Saskatchewan, 1982. 172p. (Tese de Doutorado)
- LUEKING, M.A. & SCHEPERS, J.S. Achieving desired moisture conditions in potentially mineralizable nitrogen incubation studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1370-1373, 1986.
- MALAVOLTA, E. Necessidade de alimentos e política de fertilizantes. *Pesq. Agropec. Bras.*, 16:1-26, 1981.
- MINHONI, M.T.A. & CERRI, C.C. Decomposição de vinhaça em solo sob diferentes níveis de umidade: liberação de CO₂, formação de biomassa microbiana e imobilização do nitrogênio adicionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 11:25-30, 1987.
- MOLINA, J.A.E.; CLAPP, C.E. & LARSON, W.E. Potentially mineralizable nitrogen in soil: the simple exponential model does not apply for the first 12 weeks of incubation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:442-443, 1980.
- NIRA, R. & NISHIMUNE, A. Studies in nitrogen mineralization properties of Tokachi soils by kinetic analysis. *Soil Sci. Plant Nut.*, 39:321-329, 1993.
- POTTKER, D. & TEDESCO, M.J. Efeito do tipo e tempo de incubação sobre a mineralização da matéria orgânica e nitrogênio total em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 3:20-24, 1979.
- SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar II. Deslocamento vertical e horizontal do NO₃-N e NH₄-N no solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:1103-1108, 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:33-38, 1985.
- SAMPAIO, E.V.S.B. & SALCEDO, I.H. Efeito da adição de nitrogênio e palha (¹⁴C) na liberação de CO₂ e formação de biomassa microbiana em Latossolo Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 6:177-181, 1982.
- SAMPAIO, E.V.S.B. Dinâmica do nitrogênio em solos de Pernambuco, especialmente em solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 1991. 115p. (Tese de Concurso para Titular)
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H. & BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar I: eficiência na utilização de uréia (N¹⁵) em aplicação única ou parcelada. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:943-949, 1984.
- SAS Institute, Inc. SAS user's guide: Statistics. Cary, NC, 1982.
- SEYFRIED, M.S. & RAO, P.S.C. Kinetics of nitrogen mineralization in Costa Rican soils: model evaluation and pretreatment effects. *Plant Soil*, 106:159-169, 1988.
- STANFORD, G. & SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 36:465-472, 1972.
- STANFORD, G.; FRERE, M.H. & SCHWANINGER, D.H. Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.*, 115:321-323, 1973.
- STANFORD, G.; FRERE, M.H. & VANDER POL, R.A. Effect of fluctuating temperatures on soil nitrogen mineralization. *Soil Sci.*, 119:222-226, 1975.
- URQUIAGA, S.; CRUZ, H.S. & BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugarcane: ¹⁵N and nitrogen – balance estimates. *Soil Sci Soc. Am. J.*, 56:105-114, 1992.
- ZAMBELLO Jr., E. & AZEREDO, D.F. Adubação na Região Centro Sul. In: ORLANDO FILHO, J., coord. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA/PLANALSUCAR, 1983. p.289-313. (Coleção Planalsucar, 2)
- ZAMBELLO Jr., E. & ORLANDO FILHO, J. Adubação da cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. *B. Téc. PLANALSUCAR*, 3:1-26, 1981.

