
Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 20

ISSN 1516-4675
Junho, 2004

Lodo de Esgoto na Agricultura: Estudo de Caso



República Federativa do Brasil

Luis Inácio Lula da Silva

Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Roberto Rodrigues

Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Conselho de Administração

José Amauri Dimázio

Presidente

Clayton Campanhola

Vice-Presidente

Alexandre Kalil Pires

Hélio Tollini

Ernesto Paterniani

Luis Fernando Rigato Vasconcellos

Membros

Diretoria Executiva da Embrapa

Clayton Campanhola

Diretor-Presidente

Gustavo Kauark Chianca

Herbert Cavalcante de Lima

Mariza Marilena T. Luz Barbosa

Diretores-Executivos

Embrapa Meio Ambiente

Paulo Choji Kitamura

Chefe Geral

Geraldo Stachetti Rodrigues

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Maria Cristina Martins Cruz

Chefe-Adjunto de Administração

Ariovaldo Luchiari Junior

Chefe-Adjunto de Comunicação e Negócios



ISSN 1516-4675

Junho, 2004

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 20

Lodo de Esgoto na Agricultura: Estudo de Caso

Rosana Faria Vieira

Jaguariúna, SP
2004

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio Ambiente

Rodovia SP 340 - Km 127,5 - Tanquinho Velho
Caixa Postal 69 - Cep.13820-000, Jaguariúna, SP
Fone: (19) 3867-8750
Fax: (19) 3867-8740
www.cnpma.embrapa.br
sac@cnpma.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Geraldo Stachetti Rodrigues
Secretário-Executivo: Maria Amélia de Toledo Leme
Secretário: Sandro Freitas Nunes
Membros: Marcelo A. Boechat Morandi, Maria Lúcia Saito, José
 Maria Guzman Ferraz, Manoel Dornelas de Souza, Heloisa
 Ferreira Filizola, Cláudio César de A. Buschinelli
Normalização bibliográfica: Maria Amélia de Toledo Leme
Foto(s) da capa: Ladislau Araújo Skorupa
Editoração eletrônica: Alexandre Rita da Conceição

1ª edição

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Vieira, Rosana Faria.

Lodo de esgoto na agricultura: estudo de caso / Rosana Faria
Vieira. - Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004.

18 p. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa
Meio Ambiente, ISSN 1516-4675; 20)

1. Lodo de Esgoto - Uso agrícola. 2. Milho - Adubação
mineral. I. Título. II. Série.

CDD 631.869

© Embrapa 2004

Sumário

Resumo	6
Abstracts	7
Introdução	8
Objetivo	8
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	13
Referências	21

Lodo de Esgoto na Agricultura: Estudo de Caso

Rosana Faria Vieira¹

Resumo

Avaliou-se a mineralização de N e a produtividade do milho em um solo submetido a freqüentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto. O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho-distroférico, textura média/argilosa. Os tratamentos consistiram de parcelas sem aplicação de fertilizantes ou lodo de esgoto (testemunha), parcelas com aplicação de N mineral (NM), parcelas com dose de lodo de esgoto calculada para fornecer à cultura o mesmo teor de N do tratamento NM (1N) e parcelas com duas (2N), quatro (4N), e oito vezes (8N) a dose de lodo do tratamento 1N. Os conteúdos de N mineral no solo aumentaram com a dose de lodo. As altas concentrações de nitrato em relação às de amônio foram associadas à intensa nitrificação do solo. Altas perdas de nitrato provavelmente ocorreram nos primeiros vinte e sete dias após a incorporação do lodo, mesmo nas menores doses, sugerindo que a utilização de lodo em doses calculadas com base nas necessidades da planta e na sua taxa de mineralização medida em laboratório, poderá superestimar as quantidades a serem aplicadas ao solo.

Palavras chaves: *Zea mays L.*, mineralização de N, biossólidos

¹ Engenheira Agrônoma, Doutora em Solos e Nutrição de Plantas, Embrapa Meio Ambiente.
rosana@cnpma.embrapa.br

Sewage Sludge in Agriculture: a Case Study

Abstract

The N mineralization and the maize production were assessed in a soil with frequent amendments of increasing doses of sewage sludge. The experimental site was a loamy/clayey-textured Dark Red Dystroferric Oxisol. The treatments consisted of plots without fertilizer or sludge, plots with complete fertilization, and plots receiving four different doses of sewage sludge. Dose 1 was calculated at the agronomic N rate, while doses 2, 3 and 4 were, respectively, two, four, and eight times dose 1. The mineral N contents increased with the rate of biosolid application. The high nitrate concentrations in relation to ammonium were associated to intense soil nitrification. High N losses probably occurred at the first twenty-seven days after soil sludge incorporation, even at the lowest dose, suggesting that land application of sewage sludge based on the N requirement for the crop and on its mineralization rate measured in laboratory conditions, may overestimate the rates to be applied.

Key words: *Zea mays L.*, N mineralization, biosolid

Introdução

A utilização de lodo de esgoto em solos agrícolas tem se tornado uma prática amplamente utilizada em todo mundo, em consequência de sua riqueza em nutrientes (Oliveira et al., 1995), além de seus benefícios no aumento do teor de C orgânico do solo (Melo et al., 1994) e nas suas propriedades físicas (Lindsay & Logan, 1998).

A composição química do lodo de esgoto depende de sua origem e dos tratamentos de depuração às quais ele é submetido. Em geral, eles são ricos em N, o que significa que possuem alto potencial para serem utilizados como fertilizantes nitrogenados. A recomendação da quantidade de lodo a ser aplicada é normalmente feita tomando-se como base os teores de N no lodo (Melo et al., 2001) e os requerimentos da cultura neste nutriente. É necessário, ainda, o uso de uma fração de mineralização do composto, medida em laboratório, onde a temperatura e os teores de umidade são mantidos sob controle. Considerando que em condições de campo ocorrerão flutuações consideráveis nesses dois fatores climáticos, havendo nos dias de maiores precipitações pluviais e nos dias mais quentes, um aumento da mineralização do N orgânico, a aplicação de lodo em doses baseadas na sua taxa de mineralização, medida sob condições controladas, poderá superestimar as quantidades a serem aplicadas. A utilização do lodo de esgoto, como fonte de N requer, portanto, um acompanhamento do processo de mineralização deste elemento no solo, uma vez que excessivas quantidades de NO_3^- , poderão por meio dos processos de lixiviação e desnitrificação, contaminar águas subterrâneas ou provocar o desprendimento de óxido nitroso.

Assim, o presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a produtividade do milho e a mineralização do N no decorrer do ciclo da cultura, em um solo submetido a sucessivas aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto.

Objetivo

Avaliar a mineralização do N em solo submetido a freqüentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto e seu efeito na produtividade do milho.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho distroférrico, textura média-argilosa, na Embrapa- Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental, em Jaguariúna, SP. O solo recebeu a primeira aplicação de lodo em Abril de 1999, a segunda em dezembro de 1999 e a terceira em Novembro de 2000. O milho foi utilizado como planta teste em todos os cultivos. Após a colheita o solo foi mantido em pousio até o próximo cultivo. Antes do plantio do milho, a área permaneceu sem cultivo por pelo menos nove anos e apresentava-se predominantemente com *Brachiaria sp.* As características químicas do solo medidas no início do experimento foram: $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 5,8, MO 25,5g dm^{-3} , P 3,5mg dm^{-3} (Método da resina), K: 1,51; Ca: 27,5; Mg: 8,5; Al: 1,0; H: 35; CEC: 73,5mmol_c dm^{-3} e V: 50,8%. As avaliações realizadas neste trabalho foram conduzidas no terceiro cultivo do milho, em 2000.

O experimento foi montado em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições e seis tratamentos, num total de 18 parcelas. Os tratamentos consistiram de parcelas sem aplicação de fertilizantes ou lodo de esgoto (ON), parcelas com aplicação de N mineral (NM), parcelas com lodo de esgoto contendo o mesmo teor de N do tratamento NM (1N), e parcelas com duas (2N), quatro (4N) e oito vezes (8N) a dose de lodo do tratamento 1N. Após ensaios preliminares, para o cálculo das quantidades de lodo de esgoto a serem aplicadas, tomou-se como base uma fração de mineralização do N orgânico do lodo de 30% (Boeira et al., 2002). Baseado nesta estimativa a quantidade de N presente no lodo que seria potencialmente disponível para a cultura foi estimada pela fórmula (CETESB, 1999):

$$N_{\text{disp}} = 30/100 (N_k - N_{\text{am}}) + \frac{1}{2} N_{\text{am}} + N_{\text{nit}}$$

em que: N_{disp} = nitrogênio disponível em kg kg^{-1} de lodo; N_k = nitrogênio contido no lodo de esgoto (método Kjeldahl); N_{am} = teor de N-amoniacal contido no lodo de esgoto; N_{nit} = teor de N-nítrico contido no lodo de esgoto. A dose final de lodo, na base seca, foi calculada utilizando-se a fórmula:

$$\text{dose de lodo (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{N-recomendado (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{N-disponível no lodo (kg kg}^{-1}\text{ de lodo)}$$

O lodo de esgoto utilizado foi proveniente da estação de tratamento de esgoto de Barueri, SP, que além de esgotos domésticos recebe também esgotos industriais. A digestão anaeróbia foi utilizada na estabilização do lodo. As características químicas dos lodos de esgoto utilizados nos três cultivos de milho são apresentados na Tabela 1. O lodo de esgoto foi sempre aplicado superficialmente nas parcelas e incorporado até 20 cm de solo, com enxada rotativa. As doses e as quantidades totais de lodo e de fertilizantes aplicadas de abril de 1999 a novembro de 2000 são apresentadas na Tabela 2. As parcelas (20 x 10m) incluíram seis linhas de 10 m com aproximadamente 5 sementes por metro. O espaçamento entre linhas foi de 0,9 m.

Tabela 1. Análises dos lodos de esgoto adicionados ao solo

Parâmetros	Unidades	Valores		
		1º aplicação	2º aplicação	3º aplicação
pH		6,6	6,4	6,4
C orgânico	g kg ⁻¹	248,2	271	292,9
Nitrogênio (Kjeldahl)	g kg ⁻¹	26,0	26,4	38,5
N-amoniacal	mg kg ⁻¹	1.566,9	156	2.401,0
N-nitrato	mg kg ⁻¹	106,2	106	51,3
Fósforo	g kg ⁻¹	15,9	31,2	26,9
Potássio	g kg ⁻¹	1,0	1,97	1,0
Cálcio	g kg ⁻¹	40,3	22,8	47,8
Magnésio	g kg ⁻¹	3,0	3,7	4,5
Alumínio	mg kg ⁻¹	28,78	25,30	23,28
Cádmio	mg kg ⁻¹	12,8	9,5	9,4
Chumbo	mg kg ⁻¹	364,4	233	348,9
Cobre	mg kg ⁻¹	1058	1046	953
Níquel	mg kg ⁻¹	518,4	483	605,8
Zinco	mg kg ⁻¹	2821	3335	3372
Ferro	mg kg ⁻¹	54,18	32,5	37,99
Boro	mg kg ⁻¹	36,2	11,2	29,3
Manganês	mg kg ⁻¹	429,5	335	418,9

Tabela 2. Doses de fertilizantes e de lodo de esgoto utilizados nos três cultivos de milho.

Tratamentos	1º cultivo		2º cultivo		3º cultivo	
	Fertilização	LE ¹	Fertilização	LE	Fertilização	LE
ON		-		-		-
NM	SS 80 kg ² KCl 60kg ³	-	NPK 450 kg (4-20-16) (P) Ureia 72kg (SD) ⁵	-	NPK 450 kg (4-20-16) (P) Ureia 82kg (SD) ⁵	-
1N	DAP 20kg (P) ⁴ Ureia 30kg(SD) ⁵ KCl 0,2 ⁶	8,09	KCl 1,96	3,39	KCl 1,36	5,31
2N	KCl 0,00	16,19	KCl 1,30	7,99	KCl 0,30	10,63
4N	KCl 0,00	32,38	KCl 0,20	15,98	KCl 0,00	21,26
8N	KCl 0,00	64,76	KCl 0,00	31,96	KCl 0,00	45,52

¹ Lodo de esgoto, ha⁻¹, base seca; ² Superfosfato simples, kg P₂O₅ ha⁻¹; ³ Cloreto de potássio kg K₂O ha⁻¹; ⁴ Diamônio fosfato, kg N ha⁻¹, no plantio; ⁵ kg N ha⁻¹ em cobertura. ON, sem fertilizantes ou lodo de esgoto; NF, fertilização mineral; 1N, 2N, 4N e 8N, doses 1, 2, 3 e 4 de lodo; ⁶ Kg do Cloreto de potássio por parcela.

Amostragem do solo e parâmetros avaliados: a primeira avaliação foi feita aos 15 dias antes da incorporação do lodo, a uma profundidade de 0-20 cm no solo, quantificando os seguintes parâmetros: N total (Keeney and Nelson 1982) e N mineral (NH₄⁺ + NO₃⁻). O N orgânico foi calculado subtraindo-se os teores de N total dos teores de N mineral. Após esta avaliação o solo foi de novo amostrado aos seis dias depois da incorporação do lodo (DIL) e, então, a cada 21 DIL até os 132 DIL. O conteúdo de N mineral à profundidade de 40-60cm foi também medido aos 48 e 139 DIL. A última coleta foi feita sete dias após a colheita do milho.

As coletas de amostras de solo para a determinação dos teores de N foram feitas por meio da utilização de tubos de PVC, conforme descrito por Raison et al. (1987) e Dou et al. (1997), com algumas modificações. Em cada parcela foram inseridos doze tubos de PVC (22 cm de altura; 5 cm diam.) até a profundidade de 20 cm. No dia da instalação destes tubos, quatro deles foram imediatamente retirados para a determinação inicial das diferentes variáveis. Metade dos tubos que ficaram no campo foram cobertos com tampas de PVC para prevenir a entrada de chuvas e, portanto, minimizar a lixiviação do nitrato durante o período de incubação. Os tubos foram distribuídos aleatoriamente, aos pares, i.e., um coberto ao lado de um descoberto. As diferenças entre os conteúdos de nitrato dos tubos fechados e abertos foram consideradas como nitrato lixiviado. Após a remoção das colunas, outra série foi imediatamente instalada, em locais escolhidos ao acaso entre as linhas do milho. No caso das parcelas que recebe-

ram fertilizantes minerais as colunas foram colocadas o mais próximo possível da linha de plantio. As amostras de solo coletadas no campo foram colocadas em caixas de isopor e levadas ao laboratório onde as análises tiveram início imediato. Para a extração do NH_4^+ e do NO_3^- , 50 ml de KCl 1 mol L^{-1} foram misturados a 5g de solo úmido, agitados por 30 minutos a 120 rpm e filtrados. As determinações dos teores de NH_4^+ e NO_3^- nos extratos foram realizadas por destilação a vapor, utilizando óxido de magnésio e liga de Devarda (Tedesco et al., 1985). Em cada época de amostragem a taxa de mineralização de nitrogênio (TMN) foi determinada como se segue:

$$\text{TMN (\%)} = [(\text{NiL}_1 - \text{NiSL} - \text{NiL}_0) / (\text{NorgLa} + \text{NorgLr})] \times 100$$

em que: NiL_1 = g de N inorgânico dos solos com lodo, NiSL = g de N inorgânico de solos sem lodo, NiL_0 = g de N inorgânico inicialmente adicionados com o lodo, NorgLa = g de N orgânico adicionados com o lodo; NorgLr = g N orgânico residual do solo. O N inorgânico residual do solo e o N inorgânico incorporado com o lodo foram somente considerados no cálculo da TMN realizada aos seis DIL. Estes conteúdos de N foram considerados como potencialmente lixiviáveis em decorrência das chuvas que ocorreram depois desta avaliação.

A percentagem de N mineral proveniente da mineralização do N orgânico do lodo aos seis DIL foi quantificada como se segue:

$$\text{PNML} = (\text{NML}_1 - \text{NML} - \text{NMR}_1) \times 100 / \text{NML}_1$$

em que: PNML = percentagem de N mineral proveniente da mineralização do N orgânico do lodo, NML_1 = N mineral encontrado nos tratamentos com lodo menos o N mineral do tratamento controle; NML = N mineral adicionado ao solo com o lodo; NMR_1 = N mineral residual nos tratamentos com lodo menos o N mineral residual do tratamento controle.

As eficiências do uso do N foram estimadas usando as diferenças entre os tratamentos com N (fertilizados ou com lodo) e o controle não fertilizado (Binder et al., 2002). A seguinte equação foi usada:

$$\text{EA}_N = (\text{RG}_{+N} - \text{RY}_{\text{ON/N}})$$

em que: EA_N = eficiência agrônômica do N aplicado (kg grãos/ aumento kg de N

aplicado); RG_{+N} = grãos ($kg\ ha^{-1}$); RY = grãos ($kg\ ha^{-1}$); N e ON referem-se aos tratamentos com e sem a aplicação de N, respectivamente. Nos tratamentos com o lodo o N incluiu tanto as formas orgânicas como as inorgânicas contidas no composto orgânico.

Resultados e Discussão

Na coleta realizada aos 15 dias antes da incorporação do lodo, os conteúdos de N mineral foram similares entre os tratamentos ON, NM, 1N e 2N (Tabela 3). Nos tratamentos 4N e 8N estes valores foram em média 47% maiores que a média dos outros quatro tratamentos. Os conteúdos de N orgânico nos solos dos tratamentos ON, NM, e 1N foram praticamente os mesmos. Nos tratamentos 2N, 4N e 8N os conteúdos de N orgânico foram 10, 20 e 29% maiores, respectivamente, do que a média obtida nos outros tratamentos.

Tabela 3. Conteúdos de N mineral ($NH_4^+ + NO_3^-$; NH_4^+ , NO_3^-) e orgânico ($kg\ N\ ha^{-1}$) em solo submetido a freqüentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto, 15 dias antes da incorporação do lodo de esgoto.

Treatamentos ¹	N mineral	NH_4^+	NO_3^-	N orgânico
ON	32,00	11,40	20,66	2505,00
NM	27,34	8,60	18,66	2576,60
1N	31,34	7,40	24,00	2572,60
2N	42,00	7,40	34,66	2849,34
4N	56,66	17,40	39,34	3202,00
8N	62,66	24,00	38,66	3605,34

¹ Para abreviação ver Tabela 2

Aos seis dias após a incorporação do lodo ao solo os teores de N mineral mostraram uma correlação linear positiva com as doses aplicadas ($r^2 = 95.73\%$) (Tabela 4). Nos tratamentos 1N, 2N, 4N, e 8N os conteúdos de N mineral foram significativamente maiores do que nos tratamentos ON e NM (Dunnnett test, 5%). O conteúdo de NH_4^+ constituiu-se na menor porção do N inorgânico. A percentagem de nitrato em relação à quantidade total de N mineral foi 92, 80, 76, 69, 48 e 44 %, respectivamente, para os tratamentos controle, NM, 1N, 2N, 4N e 8N, mostrando um intenso processo de nitrificação. O decréscimo do nitrato em relação aos teores de amônio nos tratamentos 4N e 8N, pode estar relacionado à sensibilidade das bactérias nitrificantes a altos níveis de amônio no solo (Paul and Clark 1989). Além disso é conhecido que os organismos heterotróficos não só decompõem a matéria orgânica do solo suprindo NH_4^+ para os nitrificadores,

como também competem com eles por este íon (Verhagen and Laanbroek 1991). O aumento de cerca de 26 % no carbono orgânico nos solos com as duas maiores doses de lodo (dados não mostrados) pode ter sido suficiente para tornar os organismos heterotróficos mais competitivos que os nitrificadores em relação à utilização do amônio. As altas quantidades de N mineral encontradas aos 6 DIL podem estar relacionadas à mineralização do N orgânico muito lábil no lodo e ao revolvimento do solo utilizado para sua incorporação. Rupturas de grandes quantidades de compostos orgânicos aumentam a área de exposição suscetível à decomposição pelos microrganismos do solo.

Tabela 4. Conteúdos de N mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$; NH_4^+ , NO_3^- ; kg ha^{-1}) em solo submetido a frequentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto.

Tratamentos ¹	Dias após a incorporação do lodo						
	6	27	48	69	90	111	132
	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$						
ON	42,00	10,00	16,00	16,66	24,00	34,00	26,00
NM	37,34	11,34	58,66	26,34	26,66	38,66	12,66
1N	96,66	10,00	17,34	16,66	22,00	40,00	18,00
2N	170,66	24,00	20,00	26,66	27,34	22,00	24,66
4N	219,34	26,66	18,66	61,34	37,34	56,00	41,34
8N	372,00	55,34	48,00	140,00	112,00	70,66	29,66
	NH_4^+						
ON	3,34	6,00	6,00	6,00	8,00	23,34	8,00
NM	7,34	5,34	48,00	11,34	13,34	22,66	5,34
1N	23,34	3,34	8,66	8,00	8,66	27,34	8,66
2N	52,66	10,00	7,34	6,66	7,34	12,00	5,34
4N	113,34	10,66	5,34	10,00	7,34	22,00	6,66
8N	208,66	9,34	8,00	15,34	16,00	22,66	4,50
	NO_3^-						
ON	38,66	4,00	10,00	10,66	16,00	10,66	18,00
NM	30,00	6,00	10,66	14,00	13,34	16,00	7,34
1N	73,34	6,66	8,66	8,66	13,34	12,66	9,34
2N	118,00	14,00	12,66	20,00	20,00	10,00	19,34
4N	106,00	16,00	13,34	51,34	30,00	34,00	34,66
8N	163,34	46,00	40,00	124,66	96,00	48,00	25,16

¹ Para abreviação ver Tabela 2

Apesar dos teores de N mineral terem mostrado uma correlação positiva com as doses de lodo, a percentagem de N mineral encontrada no solo, em relação à quantidade adicionada com o lodo (dose 1, 1N = 13,03 kg N ha^{-1} ; dose 2, 2N = 26,06 $\text{kg$

N ha⁻¹; dose 3, 4N = 53,02 kg N ha⁻¹; dose 4, 8N = 104,24 kg N ha⁻¹) diminuiu com o aumento das doses. Isto demonstra que aplicações de maiores quantidades do composto orgânico não implica em proporcional aumento ou disponibilidade de N para as culturas. Isto é um ponto importante a ser considerado quando se pretende ajustar doses no sentido de minimizar possíveis problemas ambientais sem perdas de nutrientes para as culturas.

As maiores taxas de mineralização do N orgânico em solos com o as menores doses de lodo são também demonstradas pelos dados de PNML e TMN (Tabela 5). As percentagens de N mineral que vieram da mineralização do N orgânico do lodo (PNML) nos tratamentos 1N e 2N foram, em média, 22% maiores que as obtidas nos tratamentos 4N e 8N. Isto pode ter ocorrido devido à aplicações do lodo em doses que excederam a taxa máxima na qual a comunidade microbiana poderia mineralizar o N orgânico e/ou devido a perdas por outro processo, como desnitrificação. Quando se calculou a TMN em que os teores de N orgânico residuais do solo dos tratamentos foram considerados, os valores obtidos para os tratamentos apresentaram uma maior magnitude de resposta. Neste caso o TMN para os tratamentos 1N e 2N foram, respectivamente, 68% e 46% maiores que as percentagens obtidas para os tratamentos 4N e 8N. Uma população de microrganismos adaptada a utilizar materiais orgânicos mais recalcitrantes pode ter se estabelecido nestes solos em consequência de sucessivas aplicações de altas quantidades do lodo, em detrimento dos organismos capazes de utilizar fontes mais solúveis de carbono. As TMN das outras coletas de solo não são apresentadas porque elas foram muito baixas e não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos.

Tabela 5. Percentagem de N mineral oriunda da mineralização do N orgânico do lodo (PNML) e taxa de mineralização do nitrogênio (TMN, %) obtidos aos seis dias após a incorporação do lodo de esgoto.

Tratamentos ¹	N mineral (kg ha ⁻¹)						TMN ⁸
	NMR ₀ ²	NMR ₃ ³	NML ⁴	GDIL ⁵	NML ₁ ⁶	PNML ⁷	
ON	32,00	-	-	42,00	-	-	
1N	31,34	-	13,03	96,66	54,66	76	22
2N	42,00	10,00	26,03	170,66	128,66	72	13
4N	56,66	24,66	52,02	219,34	177,34	57	7
8N	62,66	30,66	104,24	372,00	330,00	59	7

¹ Para abreviação ver Tabela 2; ² N mineral residual obtido aos 15 dias antes da incorporação do lodo; ³ N mineral residual nos tratamentos com lodo de esgoto menos o N mineral residual encontrado no tratamento controle; ⁴ N mineral adicionado com o lodo; ⁵ N mineral encontrado no solo aos seis dias; ⁶ N mineral encontrado nos tratamentos com lodo menos o N mineral encontrado no tratamento controle; ⁷ Percentagem de N mineral oriunda da mineralização do lodo, (PNML = (NML₁ - NML - NMR₁) x (100 / NML₁)); ⁸ TMN (%) = [(NiL₁ - NiSL - NiL₀) / (NorgLa + NorgLr)] x 100, em que: NiL₁ = g de N inorgânico dos solos com lodo, NiSL = g de N inorgânico de solos sem lodo, NiL₀ = g de N inorgânico inicialmente adicionados com o lodo, NorgLa = g de N orgânico adicionados com o lodo; NorgLr = g N orgânico residual do solo.

Entre os seis e os 27 DIL as reduções nos teores de N mineral (NH_4^+ e NO_3^-) aumentaram linearmente com as doses de lodo (Teste F, $P < 0,0001$) (Fig. 1). Aos 27 DIL, o conteúdo de N mineral no solo, em relação à primeira avaliação, diminuiu em 76, 70, 90, 86, 88 e 85 %, respectivamente, para os tratamentos ON, NM, 1N, 2N, 4N e 8N. Estas percentagens correspondem a decréscimos nos teores de N mineral de 32, 26, 87, 147, 193 and 317kg N ha^{-1} . Estes valores concordam com os obtidos para a lixiviação do nitrato para além da camada de 0-20 de solo entre a primeira e a segunda coleta (Tabela 6). O nitrato lixiviado aumentou com as doses de lodo (F Teste, $P < 0.0083$), em todas as coletas de solo, exceto naquela que foi realizada aos 90 DIL. Nesta época, o decréscimo nos teores de nitrato nos tubos fechados, pode estar associado à redução de chuvas entre os 69 e 90 DIL. Durante todo o cultivo do milho o período de maior precipitação pluvial ocorreu entre os 6 e 27 DIL, onde também foram obtidas as maiores lixiviações do nitrato (Fig. 2).

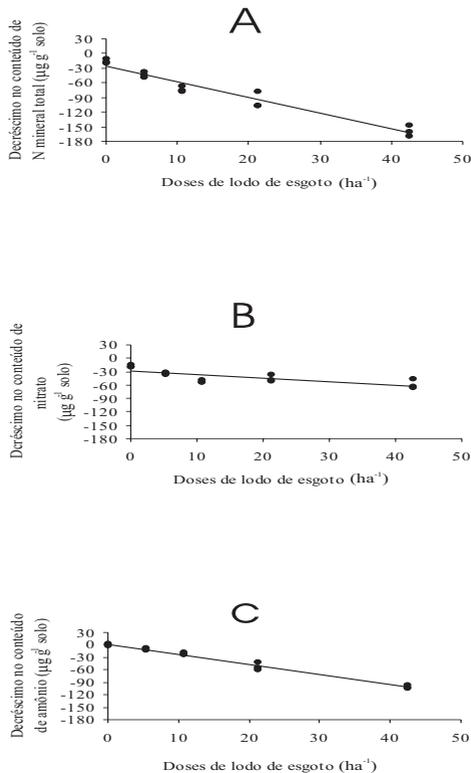


Fig. 1. Regressão linear descrevendo o decréscimo no conteúdo de N mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$; A, NH_4^+ B, NO_3^- C, kg ha^{-1}) entre o 6^o e o 27^o dia em função das doses de lodo de esgoto.

Tabela 6. Quantidades de nitrato lixiviado (kg ha^{-1}) em solos submetidos a freqüentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto.

Tratamentos ¹	Dias após a incorporação do lodo					
	27 ²	48	69	90	111	132
	NO_3^-					
0N	55,33	6,67	- ³	-	15,33	9,34
NM	46,00	3,34	59,33	-	13,33	18,67
1N	90,00	8,00	3,34	-	18,67	25,34
2N	124,66	7,34	12,00	-	-	30,00
4N	153,33	30,00	-	-	44,00	56,00
8N	336,00	144,67	42,67	-	128,67	-

¹ Para abreviação ver Tabela 2.

² Período compreendido entre 6 DIL e 27 DIL e assim por diante

³ Lixiviação não detectada

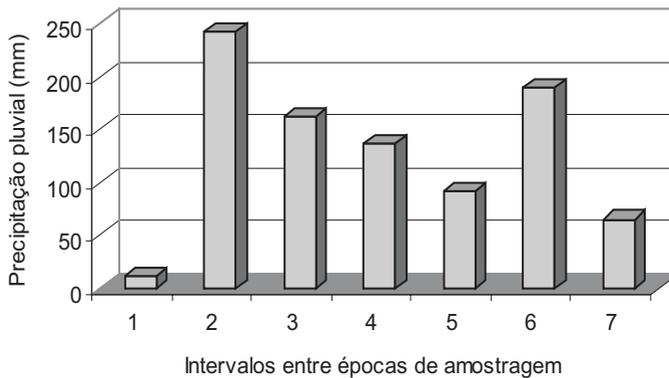


Fig. 2. Precipitação pluviométrica ocorrida durante o experimento. Numerações 1: período compreendido entre a primeira e a segunda coleta e assim por diante.

Os níveis de N mineral permaneceram praticamente constante e em torno de 22 kg N ha⁻¹, dos 27 DIL até os 132 DIL (Dunnett test, P≤5%) (Tabela 4). Para os tratamentos NM, 4N e especialmente 8N, as concentrações de N mineral ainda variaram, mostrando valores médios maiores que o controle (F Test, P≤0.05). Valores tão altos como 140 kg N ha⁻¹ de solo foram ainda encontrados no tratamento 8N. Apesar disso, os resultados das quantidades de N mineral obtidos entre os 48 e 139 DIL nas profundidades de 40-60 cm, demonstraram que grande parte dos teores de N mineralizado na camada de 0-20 cm pode ter se perdido por lixiviação, mesmo após a avaliação aos 27 DIL (Tabela 7). Aos 48 DIL embora as quantidades de N mineral para os tratamentos 2N, 4N e 8N, na camada de 0-20 cm, não fossem diferentes das quantidades obtidas para o tratamento controle, na camada de 40-60 cm eles foram 2,09, 2,60 e 4,71 vezes maiores que para o tratamento 0N, com mais de 80% do N como nitrato. Da mesma maneira, os conteúdos de N mineral nos tratamentos 4N e 8N foram 1,98 e 4,02 vezes maiores que os obtidos à profundidade de 0-20 cm.

Tabela 7. Conteúdos de N mineral (kg ha⁻¹) à profundidade de 40 – 60 cm em solo submetido a frequentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto.

Tratamentos ¹	Dias após a incorporação do lodo					
	48 NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻	139	48 NH ₄ ⁺	139	48 NO ₃ ⁻	139
0N	35,34	7,34	14,00	4,00	21,34	3,34
NM	19,34	4,00	6,00	2,66	13,34	1,34
1N	41,32	8,66	14,66	4,66	26,66	4,00
2N	74,00	22,00	14,00	2,00	60,00	20,00
4N	91,34	82,00	7,34	0,00	84,00	82,00
8N	166,66	119,34	16,66	5,34	150,00	114,00

¹ Para abreviação ver a Tabela 2.

As eficiências do uso de N (EA_N) (Tabela 8) demonstraram que altas perdas de N ocorreram em todos os tratamentos que receberam lodo. O tratamento NM mostrou uma EA_N 42% maior que a observada no tratamento 1N. Esta percentagem elevou-se para 69%, 85% e 94%, respectivamente, quando ela foi comparada com os tratamentos 2N, 4N, e 8N. Apesar dos baixos EA_N as plantas cultivadas em parcelas com as doses mais altas de lodo estavam verdes durante todo o ciclo da cultura. Isto indica uma situação em que os nutrientes se acumulam na planta com uma redistribuição restrita para os grãos.

Tabela 8. Rendimentos (kg de grãos ha⁻¹) e eficiência do uso de nitrogênio (EA_N) pelo milho em solos submetidos a freqüentes aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto.

Tratamentos ¹	Rendimento ²	EA _N
0N	3990 b	
NM	6366 a	23,76 a
1N	6814 a	13,80 b
2N	7020 a	7,40 c
4N	6941 a	3,60 c
8N	6387 a	1,46 c

¹ Para abreviação ver a Tabela 2.

² Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente, (P ≤ 0.05, Teste de Duncan)

Os elementos solúveis em água no solo podem ser absorvidos pelas plantas e/ou pelos microrganismos. No período inicial (6 - 27 DIL) o milho encontrava-se em uma fase do seu ciclo de crescimento em que a demanda da planta por N ainda era baixa. Aumentos nos teores de N causados pela aplicação do lodo ao solo, praticamente não se relacionaram com as quantidades de N imobilizadas pela biomassa microbiana (dados não apresentados). Um aumento significativo no N imobilizado somente foi observado no tratamento 8N quando avaliado aos seis DIL.

Considerando as altas quantidades de nitrato e a época em que o experimento foi conduzido, perdas de N por desnitrificação pode ter ocorrido pelo menos no período imediato à incorporação do lodo ao solo. Como um resultado da aplicação do lodo a atividade microbiana e, conseqüentemente, a demanda por aceptores de elétrons, aumenta rapidamente. Como o conteúdo de água torna-se maior a difusão de oxigênio pode ser restrita e a desnitrificação poderá vir a ocorrer mesmo em condições aeróbias (Simarmata et al. 1993). Pesquisas adicionais são necessárias para tornar claro a importância do processo de desnitrificação em solos onde o lodo é utilizado como fonte de nutrientes.

Alto potencial para mineralização do N tem sido observado em solos, nove anos após a aplicação do lodo (White et al. 1997). Estudos sobre o efeito residual do lodo nos elementos solúveis em água ajudariam a identificar adequadas estratégias de manejo dos lodos de esgoto na agricultura. Este experimento com milho demonstrou que apesar das perdas de N no tratamento 1N, seja por lixiviação ou desnitrificação, o rendimento não diferiu significativamente do tratamento que recebeu fertilização nitrogenada (Tabela 8). Isto demonstra que menores quanti-

dades de lodo poderiam ser aplicadas sem danos ao rendimento. Estudos conduzidos no período da seca em 1999 e no ano agrícola 1999/2000, nesta mesma área Vieira & Cardoso, 2003, também demonstraram que altas perdas de N podem estar ocorrendo com a recomendação do lodo realizada conforme descrita no presente trabalho. A maior eficiência do uso do N obtida no tratamento NM é resultante da aplicação do N em quantidades exigidas pela cultura para se atingir determinado patamar de produção e em época de maior demanda da planta. A aplicação de quantidades menores de lodo no plantio associado a pequenas doses de fertilizante nitrogenado em cobertura, no período adequado do ciclo de crescimento da cultura, também deveriam ser estudados.

Existe uma escassez de dados técnicos sobre a mineralização do lodo de esgoto aplicados no plantio, especialmente em áreas tropicais. Neste trabalho verificamos que a aplicação de lodo em doses calculadas tomando-se como base o requerimento da cultura em N, da forma como é feito, claramente aumenta o risco de perdas de N por lixiviação ou desnitrificação. Deve-se também ser considerado que o tipo de solo e o tipo de lodo (aeróbio ou não) influenciará a mineralização do lodo (Hernández et al. 2002) e portanto os dados obtidos não deveriam ser generalizados.

REFERÊNCIAS

BINDER, D. L.; DOBERMANN, A.; SANDER, D. H.; CASSMAN, K. G. Biosolids as nitrogen source for irrigated maize and rainfed sorghum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 531-543, 2002.

BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1639-1647, 2002.

CRASWELL, E. T. Some factors influencing denitrification and nitrogen immobilization in a clay soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 10, p. 214-245, 1978.

DOU, H.; ALVA, A. K.; KHAKURAL, B. R. Nitrogen mineralization from citrus tree residues under different production conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1226-1232, 1997.

HERNÁNDEZ, T.; MORAL, R.; PEREZ-ESPINOSA, A.; MORENO-CASELLES, J.; PEREZ-MURCIA, M. D.; GARCIA, C. Nitrogen mineralisation potential in calcareous soils amended with sewage sludge. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 83, p. 213-219, 2002.

KEENEY, D. R.; NELSON, D. W. Nitrogen-inorganics forms. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties**. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1982. p. 643-698.

LINDSAY, B. J.; LOGAN, T.; J. Field response of soil physical properties to sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 27, p. 534-542, 1998.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R. A.; LEITE, S. A. S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana de açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 449-455, 1994.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2001. p. 289-363.

OLIVEIRA, F. C.; MARQUES, M. O.; BELLINGIERI, P. A.; PERECIN, D. Lodo de esgoto como fonte de macronutrientes para a cultura do sorgo granífero. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, p. 360-367, 1995.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press, 1989.

RAISON, R. J.; CONNELE, M. J.; KHANNA, P. K. Methodology for studying fluxes of soil mineral N *in situ*. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 521-530, 1987.

SIMARMATA, T.; BENCKISER, G.; OTTOW, J. C. G. Effect of an increasing carbon-nitrate-N ratio on the reliability of acetylene in blocking the N₂O-reductase activity of denitrifying bacteria in soil. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 15, p. 107-112, 1993.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. (Boletim Técnico, 5)

VERHAGEN, F. J. M.; LAANBROEK, H. J. Competition for ammonium between nitrifying and heterotrophic bacteria in dual energy-limited chemostats. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 57, p. 3255-3263, 1991.

VIEIRA, R. F.; CARDOSO, A. A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 38, p. 867-874, 2003.

WHITE, C. S.; LOFTIN, S. R.; AGUILAR, R. Application of biosolids to degraded semiarid rangelands: nine-year responses. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 26, p. 1663-1671, 1997.