

SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

LIXIVIAÇÃO DE ÍONS INORGÂNICOS EM SOLOS REPETIDAMENTE TRATADOS COM BIOSSÓLIDO⁽¹⁾

A. R. M. ANJOS⁽²⁾ & M. E. MATTIAZZO⁽³⁾

RESUMO

A lixiviação de nitratos e dos metais K, Ca, Mg, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn, em solos repetidamente tratados com biossólido, foi avaliada num experimento em vasos, segundo um delineamento em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições, subdividindo as parcelas em aplicações. A adição de biossólidos foi feita aos vasos com capacidade para 0,5 m³ de terra, que continham Latossolo Amarelo distrófico (LAd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), a cada dois meses, num total de 388 Mg ha⁻¹. Após a aplicação do resíduo, foi feita sua incorporação na camada de 0-0,20 m do solo contido nos vasos. As aplicações de biossólidos foram sempre precedidas de amostragem de solo. Toda a água drenada através dos vasos, oriunda da precipitação atmosférica, num período de 12 meses, foi quantificada e amostrada para determinação do teor dos metais presentes, enquanto o teor de NO₃⁻ foi determinado apenas nas amostras coletadas após a primeira e a última aplicação do biossólido. As repetidas aplicações de biossólidos, em doses médias de 78 Mg ha⁻¹, proporcionaram aumento da condutividade elétrica dos solos e das quantidades lixiviadas, pela ordem, de K > Mg > Ca. A quantidade de N-NO₃⁻ lixiviada atingiu valores de até 96 mg L⁻¹, o que indica que a quantidade de biossólido a ser aplicada no solo agrícola depende do teor de N contido no resíduo. Não foi observada lixiviação de metais pesados, o que demonstra o poder de acumulação desses metais nos Latossolos utilizados.

Termos de indexação: lodo de esgoto, condutividade elétrica, metais pesados, K, Ca, Mg, pH, nitrato, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni e Zn.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado da primeira autora, apresentada ao curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"- ESALQ/USP, Piracicaba (SP). Financiado pela FAPESP. Recebido para publicação em setembro de 1999 e aprovado em junho de 2000.

⁽²⁾ Doutoranda em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz- ESALQ. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: armanjos@hotmail.com.br

⁽³⁾ Professora do Departamento de Ciências Exatas/Química Ambiental, ESALQ/USP, Caixa Postal 09, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: mmattiazzo@carpa.ciagri.usp.br

SUMMARY: *LEACHING OF INORGANIC IONS IN SOILS CONTINUOUSLY AMENDED WITH BIOSOLIDS*

The leaching of nitrates and the metals K, Ca, Mg, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb and Zn were evaluated in an experiment using biosolids amended soils. The experiment was arranged in a completely randomized block design with four treatments: Typic Hapludox with and without biosolids (LA and LA + sludge) and Rhodic Hapludox with and without biosolids (LV and LV + sludge) and four replications. Biosolids were applied to soils every two months in an average rate corresponding to 78 Mg ha⁻¹ (dry weight basis), during 11 months totalizing 5 additions and a total of 388 Mg ha⁻¹. Control treatments consisted of soil only. Soil sampling was taken before each biosolid application. Leachate was collected, sampled and analyzed. Rainfall during this period was measured. The results showed that the rate and frequency of biosolid application caused an increase on soil electric conductivity, particularly in the clayey soil. Increased leaching of K, Mg and Ca, in the order K > Mg > Ca was also observed. There was an increase on nitrate leaching caused by the biosolid addition to soil, with values as high as 96 mg L⁻¹ in the leachate. No presence of heavy metals was observed in the leachate, which shows the soil's heavy metal retention capacity. The possibility of N-NO₃⁻ leaching to groundwater makes the biosolids application to soil dependent on the biosolids content of N.

Index terms: sewage sludge, electrical conductivity, heavy metals, K, Ca, Mg, pH, nitrate, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn.

INTRODUÇÃO

A aplicação de biossólidos na agricultura é motivo de preocupação em virtude da possibilidade de movimentação de nitratos e metais pesados e conseqüente contaminação das águas subterrâneas. A preocupação com nitratos, ressaltada nos trabalhos de Shepherd (1996) e Gavi et al. (1997), torna-se particularmente importante nos casos em que a mineralização do N orgânico não é sincronizada com a absorção pela cultura (Cartron & Weil, 1998).

O movimento de metais pesados, como resultado de aplicações de biossólidos, de acordo com Hue (1995), é limitado e somente observado em solos arenosos e ácidos, com baixo teor de matéria orgânica e que receberam elevadas aplicações de biossólido associadas à elevada precipitação ou irrigação. Tackett et al. (1986) constataram lixiviação de Cd e Zn, em solos tratados com biossólidos compostados, na faixa de pH entre 5,5-6,0. Welch & Lund (1989) verificaram que o teor total de Zn lixiviado, assim como a profundidade de movimentação do elemento em solos tratados com biossólidos, foi negativamente correlacionado com o pH do solo.

Dentre os trabalhos existentes na literatura sobre lixiviação de K, Ca e Mg em áreas agrícolas que receberam biossólidos, pode-se citar o de Riekerk (1978) que, ao aplicar 247 Mg ha⁻¹ de biossólido em um solo florestal cascalhento, verificou perdas anuais, devidas ao tratamento, correspondentes a 8% do N adicionado, 15% do Ca e 1% do K.

Após irrigarem um solo franco-siltoso tratado com biossólido por três anos consecutivos, ao qual foram

aplicados anualmente 269 kg ha⁻¹ de K, na forma de KCl, antes do cultivo de milho, Jones & Hinesly (1986) observaram perdas de K por lixiviação da ordem de 8,2 kg ha⁻¹, sendo a concentração média de K recuperada no primeiro ano de 4,8 e de 2,4 mg L⁻¹ no segundo ano. Os autores concluíram que as perdas de K foram pequenas quer se considerem as quantidades fornecidas pelo fertilizante e pelo biossólido, quer pelo contido no solo.

Decorridos sete anos da aplicação de biossólidos, Campbell & Beckett (1988) verificaram que íons nitrato, sulfato, Mg, Ca, Sr, B e, possivelmente, Ba estavam ainda movendo-se através do perfil do solo, com possibilidade de atingir o lençol freático.

Medalie et al. (1994) constataram que as concentrações de N-NO₃, N-NH₄, Cl, fósforo, sulfato, Ca, Mg, Na e K na solução de um solo franco-arenoso permaneceram baixas até três meses após a aplicação, sem incorporação de 3,3; 6,9 e 14,5 Mg ha⁻¹, de biossólido. Após esse período, houve aumento na concentração de NO₃, Cl, Ca, Mg, Na e K, que atingiram valores máximos, dependendo do íon e dose considerados, 4-5 meses após. Nitrato foi o ânion dominante na solução, tendo sido a concentração de K sempre menor que as de Ca, Mg e Na. Os autores mostraram que, em aplicações de até 14,5 Mg ha⁻¹ de biossólido, uma combinação de fatores físicos, químicos e biológicos limita o movimento dos constituintes oriundos deste resíduo.

Tendo em vista a necessidade de informações sobre o assunto em solos ácidos sob clima tropical, foi realizado o presente experimento com vistas em verificar a lixiviação de nitrato e dos metais K, Ca,

Mg, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn em dois Latossolos, repetidamente tratados com bioossólidos.

MATERIAL E MÉTODOS

Solos

As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-0,30 e 0,30-0,60 m de unidades de solo pertencentes aos grupos Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Latossolo Amarelo distrófico (LAd), em áreas cultivadas com cana-de-açúcar na região de Piracicaba (SP). As características dos solos utilizados (Quadros 1 e 2) foram determinadas de acordo com métodos descritos em Camargo et al. (1986) e Raij et al. (1987).

Bioossólido

O bioossólido utilizado foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos da SABESP, localizada em Barueri (SP), que utiliza o processo de tratamento, denominado digestão anaeróbia do lodo ativado, com posterior adição de FeCl_3 e cal, para facilitar a eliminação de água por prensagem e, ao mesmo tempo, reduzir a população de patógenos a um nível seguro. O bioossólido, proveniente de uma única partida, foi armazenado a céu aberto e, antes de cada nova aplicação aos vasos do experimento, era amostrado (uma amostra composta de cinco

simples) e analisado segundo método descrito em Eaton et al. (1995). Dentre as características avaliadas, podem-se citar: pH = 7,5 (proporção 1:2,5 solo/água), $U_{65^\circ\text{C}} = 483 \text{ g kg}^{-1}$, C orgânico = 549 g kg^{-1} , como valores médios das cinco amostragens realizadas.

Instalação do experimento

O experimento foi instalado a céu aberto, em 19 de outubro de 1996 na USP/ESALQ, Piracicaba (SP), em delineamento de blocos ao acaso com quatro tratamentos: LAd sem (tratamento testemunha - LA) e com bioossólido (LA + lodo); LVd sem (tratamento testemunha-LV) e com bioossólido (LV + lodo). Os tratamentos tiveram quatro repetições, totalizando 16 parcelas experimentais. Cada parcela foi composta por um vaso, com capacidade para $0,5 \text{ m}^3$, preenchida a partir do fundo com uma tela de plástico de malha fina, 0,04 m de pedra brita lavada nº 1, novamente tela fina de plástico, 0,02 m de areia, 0,3 m de solo retirado da profundidade de 0,30-0,60 e 0,3 m da profundidade de 0-0,30m. Cada vaso comportou 555,9 kg de LA ou 486,1 kg de LV.

Aplicações de bioossólido

As quantidades de N, K, Ca, Mg, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn fornecidas pelo resíduo (Quadro 3) em cada uma das cinco aplicações diferiram entre si, conforme a variação de umidade do bioossólido. Dois dias após a aplicação manual do bioossólido na superfície do solo, era feita a sua incorporação a 0-0,20 m.

Quadro 1. Características químicas dos solos utilizados na instalação do experimento

| Amostra | pH | M.O. | P resina | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | H + Al | Al ³⁺ | SB | CTC | V |
|----------------|-----|--------------------|---------------------|------------------------|------------------|------------------|--------|------------------|----|-----|----|
| | | g kg ⁻¹ | mg kg ⁻¹ | mmolc kg ⁻¹ | | | | | | | % |
| LV 0-0,30 m | 4,4 | 32 | 13 | 1,2 | 22 | 4,6 | 48 | 2,8 | 28 | 76 | 36 |
| LV 0,30-0,60 m | 4,8 | 19 | 4 | 0,1 | 19 | 2,8 | 35 | 0,9 | 22 | 57 | 38 |
| LA 0-0,30 m | 4,3 | 15 | 6 | 0,2 | 8 | 2,3 | 24 | 2,3 | 10 | 34 | 29 |
| LA 0,30-0,60 m | 4,2 | 9 | 5 | 0,1 | 6 | 2,3 | 24 | 3,1 | 9 | 33 | 26 |

Quadro 2. Granulometria e óxidos⁽¹⁾ de silício, ferro e alumínio dos solos utilizados na instalação do experimento

| Amostra | Argila | Areia grossa | Areia fina | Silte | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ |
|----------------|--------------------|--------------|------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | g kg ⁻¹ | | | | | | |
| LV 0-0,30 m | 593 | 90 | 208 | 109 | 184 | 126 | 192 |
| LV 0,30-0,60 m | 616 | 67 | 209 | 108 | 193 | 128 | 206 |
| LA 0-0,30 m | 151 | 326 | 492 | 31 | 59 | 16 | 45 |
| LA 0,30-0,60 m | 161 | 304 | 528 | 7 | 68 | 17 | 50 |

⁽¹⁾ Determinados por ataque sulfúrico.

Quadro 3. Quantidades de N, K, Ca, Mg e metais incorporados às amostras de solo na profundidade de 0-0,20 m pelas aplicações de biossólido

| Aplicação | Quantidade de lodo ⁽¹⁾ | N | K | Ca | Mg | Cd | Cu | Cr | Ni | Pb | Zn |
|---------------|-----------------------------------|----------------------|-----|--------|-------|------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | kg vaso ⁻¹ | g vaso ⁻¹ | | | | | | | | | |
| 1ª (23/11/96) | 6,36 | 59,87 | 10 | 826 | 24 | 0,11 | 4,22 | 2,44 | 2,48 | 1,22 | 11,67 |
| 2ª (08/02/97) | 6,65 | 64,93 | 10 | 866 | 22 | 0,14 | 4,54 | 2,97 | 2,43 | 0,91 | 12,22 |
| 3ª (11/04/97) | 6,83 | 89,37 | 12 | 886 | 20 | 0,11 | 4,98 | 3,38 | 2,55 | 1,26 | 13,16 |
| 4ª (13/06/97) | 7,33 | 70,12 | 11 | 1.012 | 20 | 0,17 | 5,88 | 4,09 | 2,27 | 0,98 | 14,80 |
| 5ª (16/08/97) | 7,06 | 68,41 | 11 | 1.012 | 27 | 0,18 | 5,98 | 4,21 | 2,68 | 0,91 | 15,61 |
| Total | 34,23 | 352,69 | 54 | 4.646 | 112 | 0,71 | 25,60 | 17,09 | 12,41 | 5,29 | 67,47 |
| | Mg ha ⁻¹ | kg ha ⁻¹ | | | | | | | | | |
| Total | 387,90 | 3.996 | 577 | 52.651 | 1.173 | 8,06 | 295,77 | 193,65 | 140,61 | 59,93 | 764,50 |

⁽¹⁾ Correspondentes, respectivamente, a: 72, 75, 77, 83 e 80 Mg ha⁻¹, utilizando como base de cálculo a superfície do vaso = 0,8825 m².

Amostragem e análise de solo

Decorridos dois meses de cada aplicação de biossólido, foi feita a amostragem do solo dos vasos na profundidade de 0-0,20 m. As amostras obtidas foram analisadas segundo Raij et al. (1987). A condutividade elétrica foi feita em suspensão 1:1 solo/água com leitura em condutivímetro com largura de célula de 1 cm. Foram feitas cinco amostragens de terra no transcorrer do experimento.

Coleta de lixiviado e análises realizadas

O monitoramento da água que percolava através dos vasos iniciou-se com a primeira aplicação de biossólidos e foi feito por meio do recebimento de coletas em galões de 20 L. Após quantificação do volume total, era retirada uma alíquota para análises. Ao todo, durante o período de 11 meses de monitoramento, foram feitas 19 coletas de lixiviados. Nessas amostras, foram analisados teores de N-NH₄, N-NO₃ apenas nas três primeiras coletas, que estavam sob o efeito da primeira aplicação de biossólido, e nas cinco últimas, que estavam sob o efeito da última aplicação do resíduo, utilizando método proposto por Eaton et al. (1995).

Em todas as amostras, foram analisados: condutividade elétrica, K, Ca, Mg, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn. Todas as determinações foram feitas diretamente nos lixiviados coletados. Para os metais, à exceção do K, a quantificação foi feita por espectrofotometria de absorção atômica convencional com chama ar/acetileno.

Tratamento estatístico

As variáveis quantidade de água recolhida dos vasos, teor total de N-NO₃ na água lixiviada, pH, condutividade elétrica e teores totais de K, Ca e Mg

no lixiviado e no solo foram analisadas, segundo delineamento em blocos casualizados com quatro tratamentos e quatro repetições, sendo as aplicações consideradas subparcelas e adotando-se 5% como nível mínimo de significância (Gomes, 1987). Como foram determinados dois grupos de tratamentos, com e sem biossólido, sempre que o teste F detectou diferença entre duas médias, foi feito o desdobramento dos graus de liberdade de tratamentos em três contrastes ortogonais. Para o fator Aplicações, sempre que foi detectada diferença pelo teste F, foi realizado o detalhamento da análise por meio do teste de Tukey a 5%.

Nas interações significativas dos fatores tratamentos e aplicações, resultados conclusivos foram tomados pelas médias de um fator dentro do outro. Portanto, só são apresentados os contrastes ortogonais ou teste de Tukey para os fatores principais, quando a interação deles não foi significativa. Também foram feitos estudos de correlação linear entre a variável condutividade elétrica, K, Ca e Mg encontradas no lixiviado e na terra.

A análise exploratória de dados foi realizada por meio do teste Levene a 5% (Souza, 1998) para a homogeneidade de variâncias e análise gráfica para os resíduos. Para as variáveis em que o teste de Levene detectou heterogeneidade, verificou-se se ela era regular ou irregular, evidenciando que essas variáveis deveriam ser analisadas com as seguintes transformações (Hoaglin et al., 1992):

- Variáveis referentes à água: pH: (Y)⁻²; condutividade elétrica, K e N-NO₃: log (Y); quantidade de água lixiviada, Ca e Mg: √Y.
- Variáveis referentes ao solo: condutividade elétrica: log (Y); K: √Y.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quantidade de água lixiviada

Houve interação de tratamentos e aplicações de biossólido, com relação à quantidade de água lixiviada (Quadro 4).

Pelo quadro 5, constata-se que, apesar de ter chovido mais por ocasião da primeira aplicação de biossólido (516,2 mm), a quantidade de água lixiviada não foi a maior dentro do período total avaliado. Isso pode ser explicado por estar o solo muito seco e as primeiras chuvas servirem para saturá-lo, com conseqüente pouca drenagem de água. A quantidade de água lixiviada no período estudado foi maior após a terceira aplicação do biossólido (Quadros 5 e 6), segundo período de maior precipitação (165,5 mm).

No decorrer das aplicações, verificou-se o efeito benéfico da adição da matéria orgânica do biossólido aos solos (Quadros 5 e 6), no que diz respeito ao melhoramento da drenagem dos vasos, a qual pode ser observada pela comparação entre os tratamentos LA + lodo e LV + lodo no período que estava sob efeito da primeira e da última aplicação de biossólido, cuja precipitação foi de, respectivamente, 516,2 e 131,6 mm.

Quadro 5. Variações na quantidade de água lixiviada⁽¹⁾, considerando as aplicações de biossólido dentro de cada tratamento

| Aplicação | Total de chuva no período | LA + lodo | LA | LV + lodo | LV |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|--------|-----------|---------|
| | mm | mL kg ⁻¹ de solo | | | |
| 1 ^a | 516,2 | 39,5 e | 48,6 b | 49,0 d | 50,2 c |
| 2 ^a | 150,9 | 75,8 c | 48,7 b | 72,8 c | 59,7 b |
| 3 ^a | 165,5 | 137,7 a | 94,4 a | 144,2 a | 117,1 a |
| 4 ^a | 53,5 | 46,1 d | 37,1 c | 48,4 d | 45,0 c |
| 5 ^a | 131,6 | 87,3 b | 36,5 c | 86,6 b | 47,6 c |

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste de Tukey.

Wei et al. (1985) constataram que a aplicação de biossólido, aumentando o teor de matéria orgânica do solo, foi acompanhada por um aumento na estabilidade dos agregados, melhorando, desta forma, a permeabilidade do solo. O aumento no índice de agregação do solo e na condutividade hidráulica foi também reportado por Jorge et al. (1991) cerca

Quadro 4. Análise da variância das variáveis N-NO₃ total na água, quantidade de água lixiviada, pH do solo e condutividade elétrica e teor de Mg, Ca, K na água e no solo durante o período de aplicação de biossólido

| Causa da variância | G.L. | Q.M. | | Q.M. | | | | |
|-------------------------|------|------------------------|------|-------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------------|
| | | N-NO ₃ água | G.L. | Água lixiviada | Condutividade da água | Mg água | Ca água | K água |
| Blocos | 3 | 0,1447 | 3 | 0,4231 | 0,0540 | 0,2860 | 0,1940 | 0,0240 |
| Tratamento | 3 | 3,3072 | 3 | 10,7690* | 6,4105** | 8,9332** | 29,2385** | 4,0702** |
| Resíduo (A) | 9 | 0,1117 | 9 | | 0,0309 | 0,0828 | 0,1582 | 0,3184 |
| (Parcelas) | (15) | | (15) | | | | | |
| Aplicações | 1 | 21,4702** | 4 | 50,9671** | 3,0182** | 7,3676** | 15,1498** | 4,3220** |
| Tratamento x Aplicações | 3 | 2,2132** | 12 | 2,3014** | 0,3968** | 1,3573** | 3,2551** | 0,4730** |
| Resíduo (B) | 12 | 0,0414 | 48 | 0,2685 | 0,0134 | 0,0111 | 0,0201 | 0,0195 |
| Total | 31 | | 79 | | | | | |
| | | | | pH do solo | Condutividade do solo | Mg solo | Ca solo | K solo |
| Blocos | 3 | 0,0754 | | 0,0356 | | 1,9923 | 11,0895 | 0,0481 |
| Tratamento | 3 | 32,4004** | | 27,7356** | | 33,7997** | 28.176,93** | 1,3007** |
| Resíduo (A) | 9 | 0,0307 | | 0,0082 | | 1,1644 | 48,9432 | 0,0822 |
| (Parcelas) | (15) | | | | | | | |
| Aplicações | 4 | 1,6895** | | 1,5058** | | 5,9764** | 958,5635** | 0,014 ^{ns} |
| Tratamento x Aplicações | 12 | 0,2884** | | 0,4549** | | 0,6656** | 495,5416** | 0,0644 ^{ns} |
| Resíduo (B) | 48 | 0,0124 | | 0,0153 | | 0,1813 | 16,1045 | 0,0638 |
| Total | 79 | | | | | | | |

* Significativo, pelo teste F, a 5% ($\alpha \leq 0,05$). ** Significativo, pelo teste F, a 1% ($\alpha \leq 0,01$). ^{ns} Não-significativo, pelo teste F, considerando como n.m.s. 5% ($\alpha > 0,05$).

Quadro 6. Desdobramento dos graus de liberdade de tratamentos em contrastes ortogonais e teste F dentro de cada aplicação para as variáveis quantidade de água lixiviada, condutividade elétrica e quantidades totais de Mg, Ca, K e N-NO₃ na água lixiviada

| Causa da Variação | G.L | Q.M. | | | | |
|-------------------------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 1ª aplicação | 2ª aplicação | 3ª aplicação | 4ª aplicação | 5ª aplicação |
| Água lixiviada | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,7140 ^{ns} | 6,4337 ^{ns} | 10,2669* | 0,8789 ^{ns} | 34,4627** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 1,1893 ^{ns} | 0,0534 ^{ns} | 0,1600 ^{ns} | 0,0575 ^{ns} | 0,0022 ^{ns} |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0053 ^{ns} | 1,0642 ^{ns} | 2,4203 ^{ns} | 0,7594 ^{ns} | 1,4565 ^{ns} |
| Resíduo | 9 | 1,5407 | 1,5407 | 1,5407 | 1,5407 | 1,5407 |
| Condutividade elétrica | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,4886** | 1,5220** | 4,2360** | 7,3865** | 7,6388** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,8896** | 0,1080 ^{ns} | 0,5915** | 0,5378** | 0,1510 ^{ns} |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0176 ^{ns} | 0,0032 ^{ns} | 0,0540 ^{ns} | 0,0712 ^{ns} | 0,2968* |
| Resíduo | 9 | 0,0309 | 0,0309 | 0,0309 | 0,0309 | 0,0309 |
| Mg | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,0049 ^{ns} | 2,3744** | 14,1075** | 2,8383** | 19,9140** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0004 ^{ns} | 0,2559 ^{ns} | 2,7703** | 0,2480 ^{ns} | 0,1670 ^{ns} |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0074 ^{ns} | 0,0003 ^{ns} | 0,0020 ^{ns} | 0,0078 ^{ns} | 0,3892 ^{ns} |
| Resíduo | 9 | 0,0828 | 0,0828 | 0,0828 | 0,0828 | 0,0828 |
| Ca | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,1400 ^{ns} | 4,2838** | 30,2649** | 20,7102** | 56,3902** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,2107 ^{ns} | 0,5390 ^{ns} | 6,1158** | 4,3353** | 3,0414** |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0096 ^{ns} | 0,0772 ^{ns} | 0,0470 ^{ns} | 0,1134 ^{ns} | 0,4991 ^{ns} |
| Resíduo | 9 | 0,1582 | 0,1582 | 0,1582 | 0,1582 | 0,1582 |
| K | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,0106 ^{ns} | 1,5903 ^{ns} | 4,4771** | 2,7111* | 7,9796** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0074 ^{ns} | 0,0001 ^{ns} | 0,5084 ^{ns} | 0,0265 ^{ns} | 0,0000 ^{ns} |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0640 ^{ns} | 0,0733 ^{ns} | 0,2304 ^{ns} | 0,0340 ^{ns} | 0,1733 ^{ns} |
| N-NO₃ | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,1260 ^{ns} | nd | nd | nd | 14,2818** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,1947 ^{ns} | nd | nd | nd | 0,0002 ^{ns} |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0490 ^{ns} | nd | nd | nd | 1,9086** |
| Resíduo | 9 | 0,1117 | nd | nd | nd | 0,1117 |

* Significativo, pelo teste F, a 5% ($\alpha \leq 0,05$). ** Significativo, pelo teste F, a 1% ($\alpha \leq 0,01$). ns não-significativo, pelo teste F, considerando-se como n.m.s 5% ($\alpha > 0,05$). nd = não determinado

de quatro anos após a aplicação de biossólido e por Logan & Harrison (1995) após um ano da aplicação.

Condutividade elétrica

Para a variável condutividade elétrica da água e do solo (Quadro 4), o teste F detectou diferenças (a 1%) na interação dos fatores tratamentos e aplicações de biossólido.

A condutividade elétrica do líquido percolado pelos tratamentos com biossólido (Quadros 6 a 9) aumentou a partir da primeira aplicação do resíduo, acompanhando o aumento da condutividade elétrica

do solo, com valores máximos de 2,217 mS cm⁻¹, observado, após a quarta aplicação, no tratamento LA + lodo, e de 1,441 mS cm⁻¹, no tratamento LV + lodo, após a quinta aplicação. Para as testemunhas, nesse período, esses valores foram menores que 0,5 mS cm⁻¹.

No presente trabalho, embora a condutividade elétrica do solo nos tratamentos com biossólido tenha se mantido abaixo de 2,0 mS cm⁻¹, condição para que o solo seja classificado como não-salino (Jones Jr., 1983), convém ressaltar que aqueles valores foram obtidos em suspensão solo/água na proporção 1:1, enquanto o valor de referência, citado por Jones Jr.,

Quadro 7. Desdobramento dos graus de liberdade de tratamentos em contrastes ortogonais e teste F dentro de cada aplicação para as variáveis pH, condutividade elétrica e teores de Mg, Ca e K, referentes ao solo

| Causa da Variação | G.L. | Q.M. | | | | |
|-------------------------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 1ª aplicação | 2ª aplicação | 3ª aplicação | 4ª aplicação | 5ª aplicação |
| pH | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 8,4100** | 18,5976** | 21,1600** | 25,8826** | 26,0100** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0800 ^{ns} | 0,3003* | 0,0200 ^{ns} | 0,0200 ^{ns} | 0,0312 ^{ns} |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,0800 ^{ns} | 0,0050 ^{ns} | 0,0450 ^{ns} | 0,0003 ^{ns} | 0,0200 ^{ns} |
| Resíduo | 9 | 0,0307 | 0,0307 | 0,0307 | 0,0307 | 0,0307 |
| Condutividade elétrica | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 5,8510** | 9,6108** | 17,5897** | 23,3687** | 26,2620** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 0,2290** | 0,1029** | 0,4317** | 0,2252** | 0,1220** |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 0,8096** | 0,5846** | 1,0348** | 1,4303** | 1,0132** |
| Resíduo | 9 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 | 0,0082 |
| Mg | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 2,8056 ^{ns} | 0,3600 ^{ns} | 0,4225 ^{ns} | 0,2025 ^{ns} | 0,6806 ^{ns} |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 23,8050** | 8,2012* | 10,3512* | 9,0312* | 20,4800** |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 11,7612* | 3,7812 ^{ns} | 5,6112 ^{ns} | 7,0312 ^{ns} | 4,6512 ^{ns} |
| Resíduo | 9 | 1,1644 | 1,1644 | 1,1644 | 1,1644 | 1,1644 |
| Ca | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 4.329,64** | 7.365,93** | 10.085,18** | 17.802,23** | 20.721,60** |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 3.676,53** | 2.861,46** | 3.745,45** | 8.508,60** | 9.604,98** |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 556,11** | 292,82* | 297,68* | 345,84* | 283,22* |
| Resíduo | 9 | 48,94 | 48,94 | 48,94 | 48,94 | 48,94 |
| K | | | | | | |
| Com lodo vs sem lodo | 1 | 0,7401* | | | | |
| Com lodo (LA vs LV) | 1 | 2,0433** | | | | |
| Sem lodo (LA vs LV) | 1 | 1,1188** | | | | |
| Resíduo | 9 | 0,0822 | | | | |

* Significativo, pelo teste F, a 5% ($\alpha \leq 0,05$). ** Significativo, pelo teste F, a 1% ($\alpha \leq 0,01$). ns não-significativo, pelo teste F, considerando-se como n.m.s 5% ($\alpha > 0,05$).

em extrato de saturação. Dessa forma, dependendo da dose e da frequência da aplicação do bio sólido, associadas às condições pluviométricas regionais, poderão ocorrer períodos de maior perigo de salinização do solo, com prejuízo ao desenvolvimento das plantas.

Analisando a condutividade elétrica do solo dentro dos tratamentos com bio sólido (Quadros 7 e 8), constatou-se que, desde a primeira até à última aplicação do resíduo, ela se manteve maior no LV do que no LA, enquanto, para a água lixiviada, foi observado o contrário, fato esse atribuído à maior capacidade de retenção de íons do LV.

A condutividade elétrica da água lixiviada correlacionou-se positivamente com teores de Ca, K e

Mg presentes, enquanto no solo valores altos de correlação foram obtidos com Ca (Quadro 9). A correlação positiva e significativa entre condutividade elétrica e teor de Ca, tanto no solo quanto no lixiviado, pode ser atribuída à alta concentração desse elemento no resíduo aplicado. Rodella (1996), após incubar solo com misturas de turfa e fertilizantes minerais (NPK) por 30 dias, verificou que o aumento na condutividade elétrica do percolado obtido pela passagem de água destilada através do solo relacionou-se principalmente com teor de Ca e Mg.

Lixiviação de K, Ca e Mg

Para as variáveis K, Ca e Mg no lixiviado e teores de Ca e Mg no solo, o teste F detectou diferenças na

interação tratamentos x aplicações de biossólido, enquanto a variável K no solo foi influenciada somente pelos tratamentos (Quadro 4).

Embora a aplicação de biossólido tenha contribuído para elevar os teores trocáveis de Ca e K nos solos desde a primeira aplicação, observou-se que, somente a partir da segunda aplicação, houve aumento na lixiviação de Ca (Quadros 7 e 11), enquanto, a partir da terceira aplicação, foi possível constatar também a maior lixiviação de K (Quadros 6 e 11). A lixiviação de Mg foi observada a partir da segunda aplicação de biossólido (Quadros 6 e 11) e é curioso notar que, comparando o tratamento-testemunha com biossólido, independentemente das repetidas aplicações, não

houve diferenças no teor de Mg (Quadro 7), o que demonstra que, apesar da adição de 1.173 kg ha⁻¹ de Mg, via biossólido, essa quantidade não foi suficiente para elevar o teor do elemento na forma trocável.

Analisando a quantidade de K, Ca e Mg no lixiviado, dentro de cada tratamento e ao longo das aplicações (Quadro 11), notou-se a relação existente entre a quantidade de água percolada através dos vasos, função das chuvas no período, e a lixiviação dessas espécies químicas (Quadro 6).

Quando se consideram a quantidade total de Ca, Mg e K perdida por lixiviação e a quantidade adicionada via biossólido aos tratamentos, pôde-se calcular a percentagem de lixiviação (Quadro 11), chegando-se a valores de 10,0 a 15,5%, para o K; 2,0 a 3,3, para o Mg, e 0,4 a 0,9, para o Ca, resultados esses contrários aos encontrados por Riekerk (1978).

A lixiviação de K, Ca e Mg, no presente trabalho, também discorda do observado por Bertoncini & Mattiazzo (1999), que, após incorporar quantidades sucessivas de biossólido num total correspondente a 156 Mg ha⁻¹, em três diferentes solos, constataram que a quantidade de Ca removida pela passagem de água variou entre 13 e 19% do total presente nos solos tratados com biossólido, enquanto a quantidade de Mg removida esteve entre 9 e 20% do total presente. Convém salientar que esse experimento foi feito em tubos de percolação com capacidade para 2 kg de solo, enquanto o presente experimento utilizou vasos com capacidade para aproximadamente 500 kg de solo.

A quantidade de K no lixiviado foi alta e positivamente correlacionada com as quantidades de Ca e Mg também no lixiviado (Quadro 9). Verificou-se também uma correlação moderada e positiva ($r = 0,62^{**}$) entre a quantidade de K na água e o pH do solo. Tais observações estão de acordo com as de

Quadro 8. Variações na condutividade elétrica⁽¹⁾ no lixiviado e no solo, considerando as aplicações de biossólido dentro de cada tratamento

| Aplicação | LA + lodo | LA | LV + lodo | LV |
|---------------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| Lixiviado (mS cm⁻¹) | | | | |
| 1 ^a | 0,542 d | 0,287 d | 0,279 d | 0,260 d |
| 2 ^a | 0,515 d | 0,338 cd | 0,653 c | 0,307 c |
| 3 ^a | 1,542 c | 0,460 a | 0,896 b | 0,387 b |
| 4 ^a | 2,217 a | 0,402 b | 1,329 a | 0,484 a |
| 5 ^a | 1,895 b | 0,344 c | 1,441 a | 0,510 a |
| Solo (mS cm⁻¹) | | | | |
| 1 ^a | 0,233 d | 0,060 b | 0,328 d | 0,114 bc |
| 2 ^a | 0,562 b | 0,104 a | 0,710 b | 0,177 a |
| 3 ^a | 0,372 c | 0,040 d | 0,583 c | 0,081 d |
| 4 ^a | 0,753 a | 0,052 c | 1,052 a | 0,121 b |
| 5 ^a | 0,834 a | 0,050 c | 1,052 a | 0,102 c |

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste de Tukey.

Quadro 9. Coeficientes de correlação e respectivas significâncias estatísticas, pelo teste t, entre as variáveis condutividade elétrica, pH, K, Ca, Mg encontradas no solo e na água lixiviada, levando em consideração todos os tratamentos

| Variável | Condutividade | | pH | | K | | Ca | | Mg-solo |
|-----------|---------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | Solo | Água | Solo | Água | Solo | Água | Solo | Água | |
| Cond-água | 0,75** | | | | | | | | |
| pH-solo | 0,90** | 0,78** | | | | | | | |
| pH-água | -0,39** | -0,25* | -0,42** | | | | | | |
| K-solo | 0,20 | 0,23 | 0,16 | 0,02 | | | | | |
| K-água | 0,53** | 0,73** | 0,62** | -0,25* | 0,05 | | | | |
| Ca-solo | 0,89** | 0,52** | 0,78** | -0,31** | 0,37** | 0,44** | | | |
| Ca-água | 0,61** | 0,88** | 0,71** | -0,27* | 0,03 | 0,88** | 0,43** | | |
| Mg-solo | 0,13 | -0,15 | -0,07 | 0,32** | 0,42** | -0,12 | 0,43** | -0,19 | |
| Mg-água | 0,50** | 0,68** | 0,60** | -0,30** | 0,06 | 0,95** | 0,43** | 0,90** | -0,16 |

* e ** Significativos a 1 ($\alpha \leq 0,01$) e 5% ($\alpha \leq 0,05$), respectivamente.

Quadro 10. Variações na quantidade de Mg, Ca e K no lixiviado e no solo, considerando as aplicações de biossólido dentro de cada tratamento⁽¹⁾

| Aplicação | LA + lodo | LA | LV + lodo | LV |
|--|-----------|---------|-----------|----------|
| Lixiviado | | | | |
| Mg (mg kg⁻¹ de solo) | | | | |
| 1 ^a | 0,14 e | 0,14 b | 0,15 e | 0,13 d |
| 2 ^a | 0,44 d | 0,15 b | 0,71 d | 0,14 d |
| 3 ^a | 3,94 a | 0,58 a | 1,94 b | 0,55 a |
| 4 ^a | 0,61 c | 0,18 b | 0,90 c | 0,22 c |
| 5 ^a | 2,60 b | 0,10 c | 2,14 a | 0,29 b |
| Ca (mg kg⁻¹ de solo) | | | | |
| 1 ^a | 1,55 d | 0,87 c | 0,86 e | 0,76 d |
| 2 ^a | 3,64 c | 1,11 c | 5,88 d | 1,54 c |
| 3 ^a | 30,75 a | 3,40 a | 14,31 b | 3,95 a |
| 4 ^a | 18,71 b | 1,44 b | 8,13 c | 2,04 b |
| 5 ^a | 31,37 a | 0,97 c | 19,04 a | 2,25 b |
| K (mg kg⁻¹ de solo) | | | | |
| 1 ^a | 1,28 e | 1,34 b | 1,15 e | 1,17 c |
| 2 ^a | 2,20 d | 1,28 b | 2,23 d | 1,07 c |
| 3 ^a | 9,25 a | 2,93 a | 5,59 b | 2,13 a |
| 4 ^a | 3,66 c | 1,42 b | 3,31 c | 1,63 b |
| 5 ^a | 6,84 b | 1,48 b | 6,86 a | 2,03 a |
| Solo | | | | |
| Mg (mmolc kg⁻¹) | | | | |
| 1 ^a | 2,25 b | 3,60 a | 5,70 a | 6,03 a |
| 2 ^a | 1,93 b | 2,55 c | 3,95 c | 3,93 c |
| 3 ^a | 1,88 b | 2,50 c | 4,15 c | 4,18 c |
| 4 ^a | 2,70 a | 3,05 b | 4,83 b | 4,93 b |
| 5 ^a | 2,90 a | 3,33 ab | 6,10 a | 4,85 b |
| Ca (mmolc kg⁻¹) | | | | |
| 1 ^a | 29,68 c | 9,88 a | 72,55 d | 26,55 a |
| 2 ^a | 38,12 b | 8,08 ab | 75,95 d | 20,18 bc |
| 3 ^a | 40,22 b | 5,55 b | 83,50 c | 17,75 c |
| 4 ^a | 49,40 a | 8,73 ab | 114,63 b | 21,88 b |
| 5 ^a | 52,03 a | 8,75 ab | 121,33 a | 20,65 bc |
| K (mmolc kg⁻¹) | | | | |
| | 0,97 | 0,72 | 2,25 | 1,40 |

⁽¹⁾Médias seguidas da mesma letra, na vertical, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste de Tukey.

Goulding & Talibudeen (1984) e Chaves & Libardi (1995), que observaram uma diminuição da seletividade de adsorção do cátion K em relação ao Ca com aumento do pH da solução do solo. Os autores relacionaram esse comportamento com o aumento da densidade superficial de cargas, que favorece a adsorção dos cátions divalentes. Salazar et al. (1995), trabalhando com dois solos distintos, verificaram este mesmo comportamento, apenas no solo com alto teor de matéria orgânica. Segundo esses autores, os grupos carboxílicos da matéria orgânica do solo ionizam-se progressivamente, quando o pH do solo

se eleva, aumentando a carga negativa, que favorece a interação do solo e o Ca ao invés com o K. O estabelecimento de ligações mais fortes entre o Ca e a matéria orgânica foi relatado também por Bladel & Gheyi (1980) e Ladonin & Margolina (1997).

Embora a precipitação pluviométrica na região de Piracicaba, durante o período de monitoramento da água lixiviada, fosse atípica (Anjos, 1999), pode-se inferir que aplicações repetidas de biossólidos em doses médias de 78 Mg ha⁻¹ em áreas agrícolas podem levar à salinização dos solos, pela retenção de parte dos cátions adicionada via biossólido, vindo a dificultar o desenvolvimento das plantas. O aumento da lixiviação de Ca, K e Mg, principalmente em solos com baixos teores de argila, óxidos e CTC, pode ser agravado em períodos mais chuvosos.

pH do solo

As repetidas aplicações de biossólidos promoveram elevação gradativa do pH do solo de 4,4 para 7,4 em ambas as amostras utilizadas (Quadros 4 e 7). Esse comportamento também foi observado por outros autores (Barretto, 1995; Oliveira, 1995; Pires, 1998; Reis, 1998; Bertoncini & Mattiazzo, 1999), sendo atribuído à alcalinidade do resíduo orgânico, independentemente da natureza e das transformações da fração orgânica desses materiais.

Nitrato

Para discutir os dados relativos à lixiviação de nitrato, convém lembrar que, ao final das aplicações de biossólidos, foram adicionados 352,7 g de N por vaso, o que corresponde a uma aplicação de 3.996 kg ha⁻¹ de N (Quadro 3).

Uma vez que a análise da forma nítrica e amoniacal de N indicou que 97% do N presente nos lixiviados estava na forma nítrica (N-NO₃), optou-se por analisar os dados referentes apenas a essa forma de N que foi influenciada (1%) pela interação tratamentos e aplicações (Quadro 4).

Até 25 dias após a primeira aplicação de biossólidos (Quadro 6), ao comparar teores médios de N-NO₃ na água lixiviada dos tratamentos com e sem biossólido, verificou-se não haver aumento nessa forma de N com a aplicação do resíduo. Os teores de NO₃ expressos como média de quatro repetições em mg L⁻¹, obtidos nos vários tratamentos, foram: LA = 11; LA + lodo = 22; LV = 13 e LV + lodo = 12. Considerando a quantidade de água percolada através dos vasos nesse período (Quadro 5), a quantidade de N lixiviada como nitrato teve uma variação entre 290 e 458 mg. Diante desses resultados, pode-se afirmar que a primeira aplicação de 72 Mg ha⁻¹ de biossólido, base seca, não foi suficiente para elevar, no período, o nível de N-NO₃ na água que percolou nos vasos.

Entretanto, após a quinta aplicação, quando se compararam tratamentos com e sem biossólido

Quadro 11. Quantidade de K, Ca e Mg lixiviada nos tratamentos com biossólido e percentagem de lixiviação de K, Ca e Mg, considerando a quantidade total destes elementos adicionados aos tratamentos via biossólido

| Tratamento | 1ª aplicação | 2ª aplicação | 3ª aplicação | 4ª aplicação | 5ª aplicação | Total lixiviado ⁽¹⁾ | |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---|------|
| | | | | | | mg no volume total lixiviado no período | % |
| K | | | | | | | |
| LA + lodo | 711 | 1.224 | 5.293 | 2.035 | 3.802 | 13.065 | 15,5 |
| LA | 746 | 710 | 1.628 | 786 | 819 | 4.689 | - |
| LV + lodo | 556 | 1.083 | 2.717 | 1.608 | 3.334 | 9.298 | 10,0 |
| LV | 572 | 518 | 1.033 | 790 | 986 | 3.899 | - |
| Ca | | | | | | | |
| LA + lodo | 862 | 2.023 | 17.094 | 10.400 | 17.437 | 47.816 | 0,9 |
| LA | 480 | 616 | 1.887 | 797 | 539 | 4.319 | - |
| LV + lodo | 416 | 2.857 | 6.956 | 3.953 | 9.257 | 23.439 | 0,4 |
| LV | 368 | 750 | 1.916 | 990 | 1.094 | 5.118 | - |
| Mg | | | | | | | |
| LA + lodo | 79 | 245 | 2.189 | 337 | 1.444 | 4.294 | 3,3 |
| LA | 79 | 82 | 323 | 100 | 50 | 634 | - |
| LV + lodo | 71 | 347 | 943 | 439 | 1.039 | 2.839 | 2,0 |
| LV | 61 | 68 | 269 | 105 | 142 | 645 | - |

⁽¹⁾ Calculado pela expressão: 100 (Quantidade lixiviada trat. com biossólido – Quantidade lixiviada trat. testemunha)/Quantidade fornecida pelo biossólido (Quadro 3).

(Quadro 6), verificou-se aumento na quantidade de N-NO₃ lixiviada, que variou de 23 mg L⁻¹ (LA) para 95 (LA + lodo) e de 46 (LV) para 96 (LV + lodo). Se for considerado o volume total de água percolada no período, esses valores correspondem a lixiviações de NO₃ da ordem de 438 mg, para o tratamento LA, e 1.065 mg, para LV, enquanto nos tratamentos com biossólido esses valores foram de 4.567 mg (LA + lodo) e 4.067 mg (LV + lodo). Esses resultados demonstram que, com as repetidas aplicações, o processo de mineralização do N orgânico adicionado via biossólido elevou significativamente o nível de N-NO₃ no lixiviado, embora a quantidade total perdida por lixiviação represente apenas uma pequena parcela do adicionado. Diante desses resultados, pode-se afirmar que a aplicação repetida de 78 Mg ha⁻¹ de biossólido contribui para elevação da concentração de N-NO₃, com potencial para contaminação de aquíferos.

Observando o conteúdo de N-NO₃ no lixiviado coletado, nos dois períodos avaliados, nas testemunhas, verificou-se também lixiviação de N-NO₃ oriunda da mineralização da matéria orgânica original do solo. A comparação das concentrações médias de N-NO₃ encontradas com os limites estabelecidos pela legislação americana mostrou que, nesses tratamentos, nos dois períodos de monitoramento, as concentrações de N-NO₃ excederam o limite máximo permitido de 10 mg L⁻¹, estabelecido para

água potável e contaminação de aquíferos (USEPA, 1993). Isso evidencia a necessidade de estabelecimento desse limite para solos sob clima tropical onde ocorre intensa mineralização da matéria orgânica original ou adicionada.

Metais nos lixiviados

Os teores de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn nos lixiviados estiveram abaixo do limite de determinação do método analítico empregado, o que não indica a ausência daqueles metais na solução percolada do solo, mas, sim, que seus níveis foram inferiores a 0,08 mg L⁻¹, para Cd, Cr e Pb, e 0,01 mg L⁻¹, para Cu, Ni e Zn. Esses resultados, à exceção do Zn, concordam com os obtidos por Oliveira (1995).

Entretanto, Bertoncini & Mattiazzo (1999), estudando a lixiviação de metais pesados em tubos de percolação com diferentes solos tratados com 156 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto, detectaram a presença de Cu (concentrações de 0,3 a 1,0 mg L⁻¹, dependendo do tipo de solo) no percolado obtido pela passagem de água através dos solos AQ e LV tratados com lodo e de Ni em concentração de 1,0 mg L⁻¹, no tratamento AQ com lodo.

A ausência de lixiviação de metais no presente trabalho, apesar de terem sido incorporados metais via biossólido (Quadro 3), provavelmente está relacionada com a interação dos fatores: elevação

do pH do solo, presença de ligantes orgânicos e cálcio devidos à aplicação do biossólido e óxidos de Fe e Al nos solos. Essa interação tem sido usada por diversos autores para explicar a ausência de metais no percolado através de solos tratados com biossólidos ou outros resíduos que contêm metais pesados (Mattiazzo-Prezotto, 1994; Alloway, 1995; Wittbrodt & Palmer, 1996; Ladonin & Margolina, 1997).

CONCLUSÕES

1. As cinco aplicações de 78 Mg ha⁻¹, em média, do biossólido, num período de 11 meses, provocaram aumento na condutividade elétrica dos solos estudados e lixiviação, pela ordem, de K > Mg > Ca.

2. A elevação da concentração de N-NO₃ na água percolada através dos solos provocada pelas repetidas aplicações do biossólido fez com que a adição desse resíduo em solos sob clima tropical fosse limitada pelo teor de nitrogênio fornecido por ele.

3. Não foi constatada lixiviação dos metais Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn para camadas de solo inferiores a 0,60 m de profundidade.

LITERATURA CITADA

- ALLOWAY, B.J. Soil processes and the behaviour of metals. In: ALLOWAY, B.J., ed. Heavy metals in soil. Glasgow, Blackie Academic & Professional, 1995. p.11-37.
- ANJOS, A.R.M. Lixiviação de espécies químicas em Latossolos sucessivamente tratados com biossólido e disponibilidade de metais pesados para plantas de milho. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1999. 191p. (Tese de Doutorado)
- BARRETTO, M.C.V. Degradação da fração orgânica de diferentes resíduos e efeitos em algumas propriedades químicas e físicas de dois solos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1995. 106p. (Tese de Doutorado)
- BERTONCINI, E. I. & MATTIAZZO, M.E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. R. Bras. Ci. Solo, 23:737-744, 1999.
- BLADEL, R. van & GHEYI, H.R. Thermodynamic study of calcium-sodium and calcium-magnesium exchange in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44:938-942, 1980.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- CAMPBELL, D.J. & BECKETT, P.H.T. The soil solution in a treated with digest sewage sludge. J. Soil Sci., 39:283-298, 1988.
- CARTRON, J.M. & WEIL, R.R. Seasonal trends in soil nitrogen from injected or surface-incorporated sewage sludge applied to corn. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 29:121-139, 1998.
- CHAVES, L.H.G. & LIBARDI, P.L. Lixiviação de potássio e cálcio mais magnésio influenciada pelo pH. R. Bras. Ci. Solo, 19:145-148, 1995.
- EATON, A.D.; CLESCERI, L.S. & GRENNBERG, A.E. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19.ed. Washington, APHA/AWWA/WEF, 1995. 1082p.
- GAVI, F.; RAUN, W.R.; BASTA, N.T. & JOHNSON, G.V. Effect of sewage sludge and ammonium nitrate on wheat yield and soil profile inorganic nitrogen accumulation. J. Plant Nutr., 20:203-218, 1997.
- GOMES, F.P. Curso de estatística experimental. 12.ed. Piracicaba, Nobel, 1987. 466p.
- GOULDING, K.W.T. & TALIBUDEEN, O. Thermodynamics of K-Ca exchange in soils. II. Effects of mineralogy, residual K and pH in soils from long term ADAS experiments. J. Soil Sci., 35:409-420, 1984.
- HOAGLIN, D.C.; MOSTELLER, F. & TUKEY, J.W. Análise exploratória de dados: técnicas robustas. Lisboa, John Wiley, 1992. 446p.
- HUE, N.V. Sewage sludge. In: RECHCIGL, J.E., ed. Soil amendments and environmental quality. Boca Raton, CRC Press, 1995. p.199-247.
- JONES, R.L. & HINESLY, T.D. Potassium losses in runoff and drainage waters from cropped, large-scale lysimeters. J. Environ. Qual., 15:137-140, 1986.
- JONES Jr., J.B. A guide for the hydroponic & soilless culture grower. Portland, Timber Press, 1983. 124p.
- JORGE, J.A.; CAMARGO, O.A. & VALADARES, J.M.A.S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. R. Bras. Ci. Solo, 15:237-240, 1991.
- LADONIN, D.V. & MARGOLINA, S.E. Interaction between humic acids and heavy metals. Eur. Soil Sci., 30:710-715, 1997.
- LOGAN, T.J. & HARRISON, B.J. Physical characteristics of alkaline stabilized sewage sludge (N-Viro soil) and their effects on soil physical properties. J. Environ. Qual., 24:153-164, 1995.
- MATTIAZZO-PREZOTTO, M.E. Comportamento de Cu, Cd, Cr, Ni e Zn adicionados à solos de clima tropical em diferentes valores de pH. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1994. 197p. (Tese de Livre-Docência)
- MEDALIE, L.; BOWDEN, W.B. & SMITH, C.T. Nutrient leaching following land application of aerobically digested municipal sewage sludge in a northern hardwood forest. J. Environ. Qual., 23:130-138, 1994.
- OLIVEIRA, F.C. Metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodo de esgoto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1995. 90p. (Tese de Mestrado)

- PIRES, A.M.M. Disponibilidade de Zn e Cu adicionado a solos via lodo de esgoto para plantas de arroz. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1998. 55p. (Tese de Mestrado)
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- REIS, T.C. Variação da acidez do solo em resposta à adição de materiais orgânicos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1998. 65p. (Tese de Mestrado)
- RIEKERK, H. The behavior of nutrient elements added to a forest soil with sewage sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:810-816, 1978.
- RODELLA, A.A. Métodos de avaliação de materiais orgânicos e efeitos de sua incorporação ao solo sobre a mobilização de macronutrientes. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1996. 148p. (Tese de Livre-Docência)
- SALAZAR, I.; FAUNDEZ, K.; PINILLA, H.; PINO, M. & MORA, M.L. Efecto de la acidez sobre la selectividad de intercambio Ca/K en dos suelos del sur de Chile. *Turrialba*, 45:120-127, 1995.
- SHEPHERD, M.A. Factors affecting nitrate leaching from sewage sludges applied to a sandy soil in arable agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 58:171-185, 1996.
- SOUZA, G.S. Introdução aos modelos de regressão linear e não linear. Brasília, EMBRAPA/SPI/SEA, 1998. 489p.
- TACKETT, S.L.; WINTERS, E.R. & PUZ, M.J. Leaching of heavy metals from composted sewage sludge as a function of pH. *Can. J. Soil Sci.*, 66:763-765, 1986.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. 40 CFR Parts 257, 403 and 503. Final rules: standards for the use of sewage sludge. *Federal Register*, 58:9248-9415, 1993.
- WEI, Q.F.; LOWERY, B. & PERTERSON, A.E. Effect of sludge application on physical properties of a silty clay loam soil. *J. Environ. Qual.*, 14:178-180, 1985.
- WELCH, J.E. & LUND, L.J. Zinc movement in sewage-sludge-treated soils as influenced by soil properties, irrigation water quality, and soil moisture level. *Soil Sci.*, 147:208-214, 1989.
- WITTBRODT, P.R. & PALMER, C.D. Reduction of Cr (VI) by soil humic acids. *Eur. J. Soil Sci.*, 47:151-162, 1996.