

# SEÇÃO IX - POLUIÇÃO DO SOLO E QUALIDADE AMBIENTAL

## FRACIONAMENTO E DISPONIBILIDADE DE ZINCO POR DIFERENTES EXTRATORES EM SOLOS INCUBADOS COM LODO DE ESGOTO<sup>(1)</sup>

Josângela do Carmo Trezena de Araújo<sup>(2)</sup> & Clístenes Williams  
Araújo do Nascimento<sup>(3)</sup>

### RESUMO

O lodo de esgoto pode constituir um problema ambiental em virtude da necessidade de adequada disposição final. Dado seu elevado teor de matéria orgânica e nutrientes, tem-se considerado a possibilidade de sua utilização como fertilizante; entretanto, alguns cuidados relacionados com a biodisponibilidade e a forma de metais pesados no solo devem ser observados. No caso do Zn, um dos metais em maior teor no lodo de esgoto, o conhecimento das formas e as relações com os teores disponíveis são importantes para a previsão do comportamento desse metal no solo. Este trabalho objetivou avaliar a distribuição entre diferentes frações (troçável, matéria orgânica, óxido de ferro amorfo, óxido de ferro cristalino, residual) e a disponibilidade de Zn pelos extratores DTPA, EDTA, Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos incubados com lodo de esgoto e suas relações com a absorção de Zn por plantas de milho. Foram utilizados dois tipos de solos (Argissolo e Latossolo) com diferentes características, aos quais foram adicionadas cinco doses de lodo de esgoto (equivalentes a 0; 40,5; 81; 162 e 243 Mg ha<sup>-1</sup>). Após período de incubação de 180 dias, a incorporação do lodo de esgoto proporcionou aumento na produção de matéria seca da parte aérea do milho e ausência de toxidez de Zn nos dois solos. A dose máxima de Zn a ser adicionada por lodo de esgoto mostrou-se segura quanto à contaminação de Zn nos solos e plantas, para as condições estudadas, conforme preconizam as normas da USEPA. Os maiores teores de Zn foram encontrados nas frações: Residual > Matéria Orgânica > Troçável > Óxido de Ferro Cristalino > Óxido de Ferro Amorfo. A maior recuperação de Zn das amostras foi obtida com os extratores ácidos (Mehlich-1 e Mehlich-3); no entanto, todos foram eficientes na predição da disponibilidade do elemento.

**Termos de indexação:** metais pesados, biossólido, extração seqüencial, extrator químico.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado da primeira autora, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Recebido para publicação em abril de 2004 e aprovado em setembro de 2005.

<sup>(2)</sup> Pós-Graduanda do Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. CEP 52171-900 Recife (PE). E-mail: josangela@truenet.com.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Agronomia da, UFRPE. Bolsista do CNPq. E-mail: cwanascimento@yahoo.com

**SUMMARY: ZINC FRACTIONATION AND AVAILABILITY BY DIFFERENT EXTRACTANTS IN SEWAGE SLUDGE-INCUBATED SOILS**

*The final disposal of sewage sludge has become a cause of environmental concern. Because of its high content of both organic matter and plant nutrients, sewage sludge has been used as fertilizer. However, it is important to know the fractions and bioavailability of heavy metals in sludge-amended soils. In the case of zinc, one of the most abundant metals in sewage sludge, knowledge on forms and plant availability are important to predict its behavior in soils. The present experiment was carried out to evaluate the Zn distribution across different soil fractions after incubation with sewage sludge. In addition, Zn availability was evaluated by DTPA, EDTA, Mehlich-1, and Mehlich-3 extractants as well as its relationship with Zn uptake by corn plants. Five sewage sludge doses (0; 40.5; 81; 162; and 243 Mg ha<sup>-1</sup>) were added to two chemically and physically contrasting soil samples. After a 180 day-period incubation, sludge applications increased corn shoot dry weight, with no Zn toxicity symptoms in both soils. The EPA recommended Zn dose was safe regarding Zn contamination of soils and plants. The Zn content in several soil fractions follow the order: Residual > Organic matter > exchangeable > crystalline iron oxide > amorphous iron oxide. Mehlich-1 and Mehlich-3 extractants presented the highest Zn recovery, but all of them were effective to predict Zn availability.*

*Index terms: heavy metals, biosolid, sequential extraction, chemical extractant.*

**INTRODUÇÃO**

Em virtude da elevada quantidade de lodo de esgoto produzido em todo mundo, tem sido considerada a possibilidade de sua disposição final, de modo reciclável, pela utilização na agricultura (Andreoli & Pegorini, 1999). Entretanto, a presença de metais pesados no lodo demanda especial atenção no que diz respeito à eventual contaminação, ou mesmo poluição, do lençol freático e de camadas subsuperficiais de solos pela movimentação de metais pesados (Bertoncini & Mattiazzo, 1999). Além disso, o aumento da disponibilidade e absorção pelas plantas pode comprometer o meio ambiente, mediante sua introdução na cadeia alimentar, inclusive com possibilidade de contaminação humana e animal, quando aplicado em doses elevadas e sem critérios que assegurem baixo impacto ambiental.

O lodo de esgoto da Companhia Pernambucana de Saneamento (Estação de Tratamento de Esgoto da Mangueira) apresenta quantidades apreciáveis de matéria orgânica e nutrientes, sendo um potencial fertilizante e condicionador de solos (Nascimento et al., 2004). Apesar dessas qualidades, a disposição final deste lodo exige monitoramento da biodisponibilidade dos metais presentes. Dentre estes, o Zn merece especial atenção pelo elevado teor no lodo e pelo elevado potencial de disponibilidade.

Para avaliar a disponibilidade de Zn, têm sido utilizados métodos de extrações simples, tais como: sais neutros, ácidos, bases e agentes quelantes ou

complexantes (Abreu et al., 2002). No entanto, como a quantidade do elemento varia com o extrator, essas extrações têm apresentado graus variados de sucesso, para diagnose de deficiência ou toxidez desse elemento para as plantas (Nascimento et al., 2002). Por sua vez, as extrações químicas sequenciais são úteis para se inferir a biodisponibilidade de metais pesados, como o Zn, em diferentes frações de solo (Shuman, 1986; Oliveira et al., 1999) e podem ser extremamente úteis no entendimento das alterações decorrentes das mudanças de formas químicas e das variações temporais na biodisponibilidade de metais em solos tratados com este resíduo.

Segundo Barrow (1993), um maior tempo de contato propicia que o Zn passe para formas mais estáveis, como óxidos cristalinos, uma vez que a reação pode continuar lentamente com a difusão dos íons adsorvidos para o interior das partículas, demonstrando a importância do tempo nas transformações do Zn adicionado aos solos. Oliveira et al. (1999) e André et al. (2003) afirmam que períodos curtos (30 dias) de incubação do solo com Zn, como realizado em alguns trabalhos, são insuficientes para que ocorram todas as reações do solo que afetam a biodisponibilidade.

Este trabalho objetivou avaliar a distribuição entre diferentes frações e a disponibilidade de Zn pelos extratores DTPA, EDTA, Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos incubados com lodo de esgoto da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e suas relações com Zn absorvido por plantas de milho.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras de dois solos no estado de Pernambuco, nos municípios de Carpina e Ipojuca, obtidos do horizonte superficial (0–20 cm), os quais foram classificados, respectivamente, como Argissolo Amarelo distrófico latossólico (PA) e Latossolo Amarelo coeso típico (LA). Estes solos foram selecionados para o experimento de acordo com seus valores diferentes de argila, matéria orgânica e pH. Antes do início do experimento, as amostras foram caracterizadas química e fisicamente (Quadro 1).

O lodo de esgoto utilizado foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico (ETE) do bairro da Mangueira, Recife, pertencente à COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento). Após seco, o material foi submetido às digestões sulfúricas, para determinação de N; nítrico-perclórica, para determinação dos elementos P, K, Ca, Mg, Na, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb e Cd, e combustão em mufla, para determinação do conteúdo de matéria orgânica (Quadro 2).

As amostras de solo e do lodo de esgoto, isoladamente, foram secas, homogeneizadas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha. As doses de lodo utilizadas foram estabelecidas em proporções de 0,0; 0,25; 0,50; 1,00 e 1,50 vez o limite máximo aceitável da concentração de Zn após a

**Quadro 1. Caracterização química e física das amostras de solos utilizados no experimento**

Característica	Latossolo	Argissolo
pH em H <sub>2</sub> O(1:2,5) <sup>1</sup>	4,3	6,1
C.O. (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	9,63	3,92
M.O. (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>2</sup>	16,61	6,76
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	1,6	2,04
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	0,8	2,63
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	1,35	0,0
Na (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	0,14	0,15
P (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	15,1	17,6
K (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	0,24	0,55
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>1</sup>	11,22	1,90
Zn (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	0,9	3,5
Cu (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	0,6	0,6
Fe (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	58,6	19,1
Mn (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>3</sup>	1,8	5,2
Zn total (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>4</sup>	54,8	41,7
Cu total (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>4</sup>	16,7	10,5
Fe total (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>4</sup>	48.765,1	9.090,2
Mn total (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>4</sup>	133,2	100,6
Areia (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	504	760
Silte (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	84	69
Argila (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>	412	171

<sup>(1)</sup> Embrapa (1997). <sup>(2)</sup> Kiehl (1985). <sup>(3)</sup> Mehlich-1 (De Filippo & Ribeiro, 1997). <sup>(4)</sup> Estados Unidos (1996).

**Quadro 2. Caracterização química do lodo de esgoto utilizado no experimento**

Característica	Valor
pH em H <sub>2</sub> O (1:2,5) <sup>(1)</sup>	5,7
N-total (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	22,5
Carbono (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>	285,9
M.O. (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>	493,0
Relação C/N <sub>-total</sub>	12,7
Cálcio (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	15,3
Magnésio (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	1,9
Sódio (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	1,0
Potássio (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	1,9
Fósforo (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	4,7
Manganês (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	127
Zinco (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	865
Chumbo (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	350
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	128
Cádmio (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	31
Ferro (mg kg <sup>-1</sup> ) <sup>(3)</sup>	15.816

<sup>(1)</sup> Embrapa (1997). <sup>(2)</sup> Kiehl (1985). <sup>(3)</sup> Embrapa (1999).

aplicação de lodo de esgoto ao solo, que corresponde a 140 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de Zn, segundo a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) (Estados Unidos, 1993). As doses utilizadas, considerando a concentração de Zn no lodo, foram equivalentes, respectivamente, a 0; 40,5; 81; 162 e 243 Mg ha<sup>-1</sup> (massa seca).

As amostras de solo mais lodo, com volume final de 3,5 dm<sup>3</sup>, foram incubadas em laboratório, em sacos plásticos, com umidade mantida próxima à capacidade de campo por um período de 180 dias. Ao final deste período, foram coletadas subamostras para determinação dos teores disponíveis de Zn por diferentes extratores químicos e dos teores deste elemento em frações do solo. As subamostras coletadas foram submetidas à secagem em estufa a 65 °C, maceradas e passadas em peneira com abertura de 0,5 mm de malha.

Para avaliar a disponibilidade, foram testados os métodos Mehlich-1 (De Filippo & Ribeiro, 1997), Mehlich-3 (Mehlich, 1984), DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) e EDTA (Lantmann & Meurer, 1982). A extração sequencial foi baseada no método de Shuman (1985), com exceção da fração óxido de ferro amorfo, que foi obtida pelo método de Chao & Zhou (1983). Esse fracionamento separou o Zn nas frações: trocável, matéria orgânica, óxido de ferro amorfo e óxido de ferro cristalino e foi efetuado como descrito abaixo.

**Fração Trocável (Tr)** – Cinco gramas de TFSA e 20,00 mL de Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup> foram agitados, por duas horas, em um tubo de centrífuga com capacidade para 50 mL. Em seguida, a amostra foi

centrifugada, o sobrenadante filtrado e 20 mL de água destilada adicionados ao tubo. A amostra sofreu outra agitação, por 3 min, foi centrifugada e filtrada. Os dois sobrenadantes foram combinados para análise.

**Fração Matéria orgânica (MO)** – Dez mililitros de NaClO 5–6 dag L<sup>-1</sup>, pH 8,5 (ajustado imediatamente antes do uso em decorrência da sua alta instabilidade em relação ao pH), foram adicionados ao tubo de centrífuga e a amostra aquecida em banho-maria a 100 °C, durante 30 min, ocasionalmente agitada. Em seguida, a amostra foi centrifugada e o sobrenadante filtrado. Esse procedimento foi repetido duas vezes e os três filtrados combinados. Após adição de 10 mL de água destilada, a amostra no tubo de centrífuga foi agitada, por 3 min, centrifugada, filtrada e o filtrado adicionado ao extrato de NaOCl das extrações anteriores.

**Fração Óxido de ferro amorfo (OxFeA)** – Trinta mililitros de NH<sub>2</sub>OH.HCl 0,25 mol L<sup>-1</sup> + HCl 0,25 mol L<sup>-1</sup> pH 3,0 foram adicionados à amostra no tubo de centrífuga, seguindo-se agitação por 30 min. As amostras foram centrifugadas, filtradas e lavadas como na extração anterior.

**Fração Óxido de ferro cristalino (OxFeC)** – Trinta mililitros de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (oxalato de amônio) 0,2 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (ácido oxálico) 0,2 mol L<sup>-1</sup> + ácido ascórbico 0,01 mol L<sup>-1</sup>, pH 3,0, foram colocados em contato com a amostra de solo no tubo de centrífuga e aquecidos, por 30 min, a 100 °C em banho-maria, sendo ocasionalmente agitados. Em seguida, as amostras foram submetidas à centrifugação e à filtração.

Os teores dos micronutrientes na fração residual foram obtidos pela diferença entre o teor total e a soma das frações anteriores. Os teores totais de Zn foram obtidos por digestão ácida, em forno microondas, de acordo com Estados Unidos (1996).

Após o período de incubação, as amostras que continham as doses de lodo foram transferidas para vasos com capacidade de 3,5 dm<sup>3</sup>, nos quais foi semeado milho, cultivar São José, deixando-se, após o desbaste, duas plantas por vaso, as quais foram cultivadas por 40 dias. Durante o ensaio, essas amostras foram mantidas com 80 % da capacidade de campo, mediante pesagem e irrigação diárias para complementação da água perdida por evapotranspiração. Ao final do período de cultivo, foi coletada a parte aérea das plantas. Após secagem em estufa a 65 °C, por 72 h, a produção de matéria seca foi quantificada por gravimetria. O material vegetal foi submetido à digestão nítrico-perclórica (Malavolta et al., 1989).

A leitura de Zn em todos os extratos obtidos foi efetuada por espectrofotometria de absorção atômica.

O ensaio foi montado em delineamento inteiramente casualizado utilizando-se dois solos, cinco doses de lodo com três repetições, sendo os dados obtidos submetidos à análise de variância e de regressão, utilizando-se o programa SAEG (Sistema de Análise Estatística e Genética) da Universidade Federal de Viçosa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A incorporação do lodo de esgoto proporcionou aumento significativo na produção de matéria seca da parte aérea do milho nos dois solos estudados, em gradações proporcionais às doses aplicadas (Quadro 3 e Figura 1). Esses resultados estão em concordância com os obtidos por Berton et al. (1997) e Nascimento et al. (2004) e são decorrentes, principalmente, do fornecimento de nutrientes pela aplicação do lodo de esgoto. A produção de matéria seca no Argissolo foi maior do que no Latossolo. Este resultado deveu-se provavelmente à maior decomposição da matéria orgânica adicionada via lodo no Argissolo (solo mais arenoso) e conseqüente maior liberação de N e outros nutrientes para as plantas. O pH inicial mais baixo do Latossolo (Quadro 1) pode ter também contribuído para menor absorção de nutrientes, com conseqüências na produção de matéria seca.

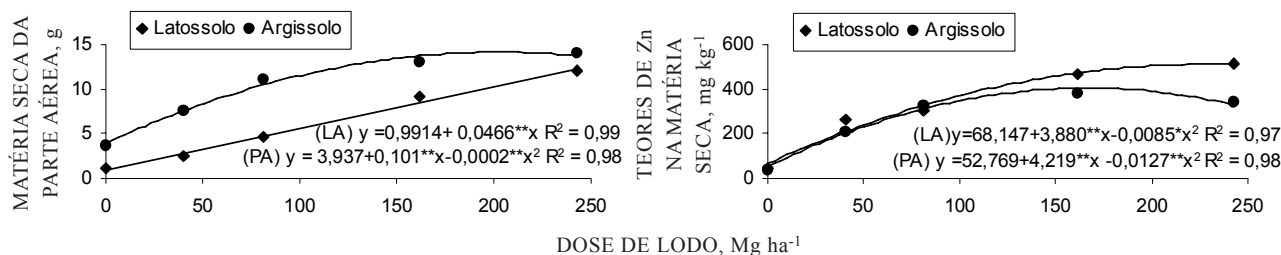
As doses de lodo provocaram decréscimo no pH das amostras do Argissolo em relação à testemunha, enquanto, no Latossolo, originalmente mais ácido, esta alteração não foi significativa ( $p > 0,05$ ) (Quadro 3). Este resultado decorre da utilização de lodo de esgoto não calado, portanto ácido (Quadro 2) e mostra que a correção deste material poderia resultar, além de maior segurança para aplicação do lodo de esgoto no que diz respeito à disponibilidade de metais pesados e redução de patógenos (Andreoli et al., 2001), em maiores benefícios agrônômicos. No entanto, deve-se observar que as doses utilizadas neste trabalho são muito altas; com a utilização de doses agrônômicas, este efeito sobre o pH pode não afetar o crescimento (Nascimento et al., 2004) ou a produção de milho (Gomes, 2004).

Com relação à absorção de Zn pelo milho, a análise de regressão revelou que a adição de lodo de esgoto aumentou significativamente os teores desse metal na parte aérea das plantas (Figura 1), resultado corroborado por Anjos & Mattiazzo (2000) e Nascimento et al. (2004) em decorrência de sua alta concentração no resíduo e conseqüente aumento em sua biodisponibilidade. Os teores de Zn encontrados nas plantas cultivadas no Latossolo foram maiores do que no Argissolo, independentemente de aplicação do lodo de esgoto, ainda que permanecendo abaixo do limite de fitotoxidez, com exceção da maior dose aplicada ao Latossolo pouco acima do teor



**Quadro 3. Produção de matéria seca, teores e conteúdos de Zn em plantas de milho submetidas a doses de lodo de esgoto em dois solos**

Dose	Latossolo				Argissolo			
	pH	M. S	Teor	Conteúdo	pH	M.S	Teor	Conteúdo
Mg ha <sup>-1</sup>		g vaso <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	µg (vaso)		g vaso <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	µg (vaso)
0	4,0	1,2	45	53	6,0	3,7	41	149
40,5	4,0	2,5	262	657	4,7	7,7	212	1.629
81	4,1	4,7	300	1.398	4,5	11,2	330	3.695
162	4,6	9,2	468	4.297	4,1	13,0	380	4.910
243	4,4	12,0	513	6.159	4,3	14,0	339	4.779
C.V. (%)	5,3	7,6	4,9	6,7	3,0	8,7	12,4	18

**Figura 1. Matéria seca da parte aérea, teores de Zn de acordo com doses de lodo de esgoto em dois solos de Pernambuco.**

considerado fitotóxico (500 mg kg<sup>-1</sup>) (Chaney & Ryan, 1993); ainda assim, sem apresentar qualquer sintoma de fitotoxidez. Coincidentemente, Rappaport et al. (1988), mesmo utilizando doses de Zn, via lodo de esgoto, acima dos limites estabelecidos pela *USEPA*, não constataram toxidez deste elemento em plantas de milho, nos diversos solos estudados.

Ao contrário, Berti e Jacobs (1996), em experimento realizado em área que recebeu por oito anos doses elevadas de lodo de esgoto, totalizando 240, 690 e 870 Mg ha<sup>-1</sup> aplicadas ao cultivo do milho em um Argissolo, verificaram redução na produção vegetal, o que foi atribuído à fitotoxidez de metais, provavelmente de Zn e Ni, pelo fato de terem sido detectados teores elevados nas frações potencialmente disponíveis à absorção pelas plantas.

As quantidades de Zn nas plantas de milho cultivadas no Argissolo foram maiores do que naquelas crescidas no Latossolo (Quadro 3). Como o teor de argila é a característica mais relacionada com a adsorção de Zn em solos (Shuman, 1975; Nascimento & Fontes, 2004), o efeito da textura do solo sobre o acúmulo desse metal nas plantas cultivadas no Latossolo, aliado à maior produção de matéria seca obtida no Argissolo, pode ser a principal razão para esse resultado. Como comentado anteriormente, maior decomposição de lodo no

Argissolo pode ter também contribuído para maior disponibilidade e acúmulo de Zn nesse solo. Todavia, em ambos os casos, as quantidades absorvidas permaneceram inferiores a 2 % das doses de lodo aplicadas. Segundo Chang et al. (1987), as quantidades de metais absorvidas por plantas em áreas nas quais foram aplicados biossólidos são pequenas e, geralmente, inferiores a 1 % da quantidade fornecida pelo resíduo. A maior recuperação do Zn aplicado pelas plantas em nosso ensaio deveu-se ao cultivo em vasos, situação na qual o contato das raízes com o elemento é aumentada, resultando em maior absorção.

As concentrações de Zn nas frações, bem como o Zn total, variaram conforme os solos e as doses de lodo aplicadas. Após 180 dias de incubação com lodo, independentemente da dose e do solo, os maiores teores foram encontrados nas frações: residual e matéria orgânica (Quadro 4), indicando a baixa disponibilidade do elemento decorrente do período de contato com solo, atribuída à presença de formas altamente estáveis, como a residual (Shuman, 1985; Xiang et al. 1995) e sua afinidade pela matéria orgânica (Nyamangara & Mzezewa, 1999; Silveira, 2002).

As doses aplicadas de lodo de esgoto resultaram em aumentos significativos nos teores totais de Zn nos solos (Figura 2), também observados por

Oliveira & Mattiazzi (2001) e Nascimento et al. (2004). Os teores totais de Zn nos solos na dose máxima preconizada pelos Estados Unidos (1993), 162 Mg ha<sup>-1</sup>, estiveram abaixo da concentração de Zn permitida em solos pela aplicação de lodo de esgoto.

Após 180 dias de incubação, observou-se aumento significativo do teor de Zn em todas as frações analisadas de acordo com a dose aplicada, com exceção da fração óxido de ferro amorfo (Quadro 4 e Figura 2), que mostrou aumentos mais expressivos para as frações: trocável e matéria orgânica. Este

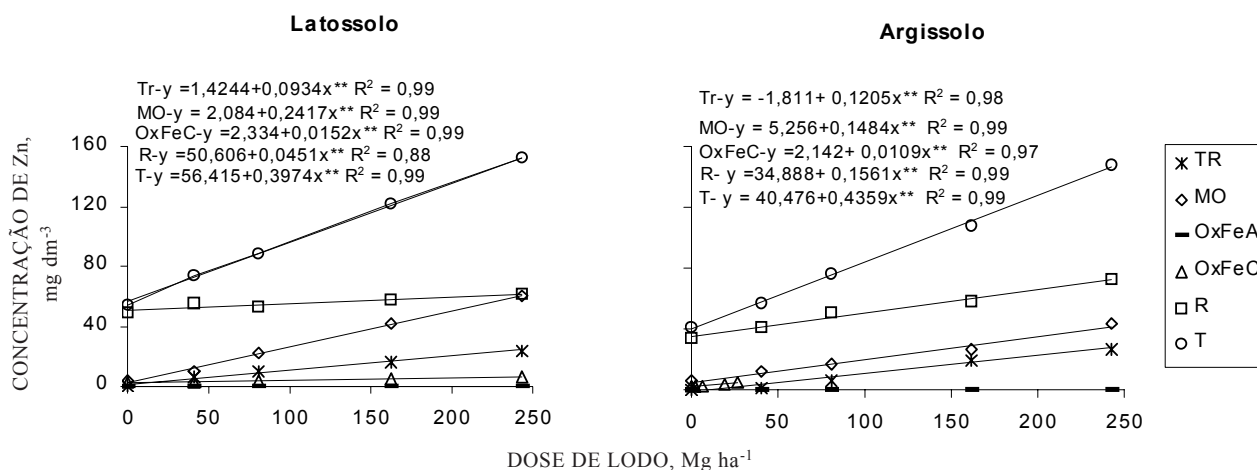
resultado indica a potencialidade de o resíduo fornecer teores disponíveis de Zn para as plantas, corroborada pelo aumento dos teores de Zn nas plantas com as doses de lodo aplicadas (Figura 1).

Os teores médios de Zn disponível, independentemente dos solos e das doses de lodo aplicadas, foram maiores com os extratores ácidos (Mehlich-1 e Mehlich-3) seguidos pelos agentes quelantes EDTA e DTPA (Quadro 5), mesma tendência observada por Nascimento et al. (2002) e que se relaciona com o próprio mecanismo de atuação dos extratores, com maior recuperação de Zn pelos extratores que ata-

**Quadro 4. Concentração de zinco nas frações: trocável (Tr), matéria orgânica (MO), óxido de ferro amorfo (OxFeA), óxido de ferro cristalino (OxFeC), residual (R) e total (T) e percentagem relativa em cada uma dessas frações em relação ao zinco total, no lodo e em solos submetidos a doses do resíduo**

Dose	Tr		MO		OxFeA		OxFeC		R		T
	mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>	%	mg kg <sup>-1</sup>
Latossolo											
0	-( <sup>1</sup> )	0	3,09	6	-	0	2,42	4	49,23	90	54,75
40,5	5,82	8	10,42	14	-	0	2,78	4	55,12	74	74,14
81	10,45	12	21,64	24	0,10	0	3,57	4	53,07	60	88,83
162	16,39	14	41,87	34	0,30	0	4,99	4	57,71	48	121,27
243	23,66	16	60,64	40	0,44	0	5,93	4	61,64	40	152,32
Médias	11,3	10	27,5	23,6	0,17	0	3,9	4	55,3	62,5	98,3
C.V. (%)	8,3		4,2		18,4		3,5		10,6		6,4
Argissolo											
0	-	0	5,57	13	-	0	2,23	5	33,87	81	41,67
40,5	1,79	3	12,29	21	-	0	2,67	5	40,68	71	57,43
81	5,91	8	16,89	22	-	0	2,89	4	50,50	66	76,19
162	19,57	18	26,57	25	-	0	3,67	3	58,64	54	108,45
243	27,12	18	43,10	29	-	0	4,98	3	72,95	49	148,15
Médias	11	9,5	21	22	-	0	3,3	4	51	64,4	86,4
C.V. (%)	5,8		2,7		-		5,2		7,8		3,4

(<sup>1</sup>) Abaixo do limite de detecção.



**Figura 2. Efeito de doses na distribuição de Zn em frações de solos incubados com lodo de esgoto.**

cam os colóides por dissolução ácida. Os maiores teores extraídos do Argissolo comparativamente ao Latossolo são decorrentes, provavelmente, das diferenças em capacidade tampão entre os solos.

As correlações entre o Zn absorvido pelas plantas e o obtido pelos diferentes extratores foram altamente significativas ( $p < 0,01$ ) (Quadro 6), indicando a eficácia semelhante dos métodos químicos em avaliar a disponibilidade do Zn para as plantas em solos enriquecidos com esse elemento, o que dificulta a identificação do melhor extrator em condições de altos teores de Zn em solos, como sugerido por Abreu (2002). Embora o Mehlich-1 tenha apresentado ligeira superioridade dentre os métodos de extração utilizados neste trabalho, critica-se Mehlich-1 por também ser um extrator de formas de nutrientes não-disponíveis ligados a sítios de adsorção específica. Quando utilizado em solos de pH elevado (diferentemente dos solos utilizados neste trabalho),

o Mehlich-1, em virtude de sua elevada acidez, poderia também extrair Zn ligado a hidróxidos e carbonatos que não estariam disponíveis às plantas (Novais & Smyth, 1999).

Todos os extratores testados apresentaram maiores correlações com as frações: trocável e matéria orgânica, consideradas mais biodisponíveis, e ausência de correlação com o Zn residual, considerado indisponível às plantas (Quadro 6). Este resultado corrobora a eficiência semelhante entre os extratores para avaliação da disponibilidade de Zn em solos enriquecidos com o elemento.

Como observado para os quatro extratores estudados, o teor de Zn nas plantas foi mais bem correlacionado com a fração trocável do elemento nos solos (Quadro 6). Em condições de acidez, como as observadas neste trabalho, o Zn disponível encontra-se proporcionalmente em teores mais elevados na forma trocável (Nascimento et al., 2002) o que justificaria os resultados obtidos.

**Quadro 5. Teores de Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) pelos extratores DTPA, EDTA, Mehlich-1 (M-1) e Mehlich-3 (M-3) em solos tratados com lodo de esgoto**

Dose	DTPA	EDTA	M-1	M-3
Latossolo				
Mg $\text{ha}^{-1}$				
0	0,70	0,81	1,11	1,89
40,5	7,18	9,97	15,24	15,35
81	13,53	20,90	26,21	25,83
162	25,12	40,43	56,19	49,59
243	38,84	61,99	82,63	73,31
Médias	17,07	26,82	36,28	33,19
C.V. (%)	5,1	6,5	3,4	5,9
Argissolo				
0	3,23	3,81	4,77	5,30
40,5	15,75	17,68	20,28	20,74
81	30,14	29,44	31,64	31,71
162	49,25	52,45	63,84	65,62
243	58,61	67,64	85,45	83,15
Médias	31,39	34,21	41,20	41,30
C.V. (%)	4,4	5,7	3,8	3,2

## CONCLUSÕES

1. A incorporação do lodo de esgoto proporcionou aumento na produção de matéria seca da parte aérea do milho e ausência de toxidez de Zn nos dois solos estudados.

2. A dose máxima de Zn a ser adicionada por lodo de esgoto mostrou-se segura quanto à contaminação de Zn nos solos e plantas, para as condições estudadas, conforme preconiza as normas da USEPA.

3. Após 180 dias de incubação do lodo de esgoto com o solo, os maiores teores de Zn foram encontrados nas frações: Residual > Matéria Orgânica > Trocável > Óxido de Ferro Cristalino > Óxido de Ferro Amorfo.

4. A maior recuperação de Zn das amostras foi obtida com os extratores ácidos (Mehlich-1 e Mehlich-3); no entanto, todos foram eficientes na predição da disponibilidade do elemento.

**Quadro 6. Coeficientes de correlação linear simples entre os teores de Zn obtidos por extratores químicos, nas frações do solo e na parte aérea de milho, em amostras de dois solos de Pernambuco**

	Tr	MO	OxFeA	OxFeC	R	T	P.A
M-1	0,97***	0,93***	0,52**	0,91***	-0,05 <sup>ns</sup>	0,79***	0,70***
M-3	0,97***	0,89***	0,44**	0,87***	-0,11 <sup>ns</sup>	0,74***	0,68***
DTPA	0,89***	0,73***	0,20 <sup>NS</sup>	0,69***	-0,36*	0,52**	0,59***
EDTA	0,96***	0,90***	0,46**	0,87***	-0,12 <sup>ns</sup>	0,74***	0,66***
P.A	0,71***	0,67***	0,47**	0,68***	0,19 <sup>ns</sup>	0,67***	-

\*, \*\*, \*\*\* e ns: Significativos a 5, 1 e 0,1 %, respectivamente e Não-significativo.

## LITERATURA CITADA

- ABREU, C.A.; ABREU, M.F. & BERTON, R.S. Análise química de solo para metais pesados. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ, V., V.H. Tópicos em Ciências do Solo, 2:645-629, 2002.
- ANDRÉ, E.M.; CRUZ, M.C.P.; FERREIRA, M.E. & PALMA, L.A.S. Fração de zinco em solo arenoso e suas relações com disponibilidade para *Cynodon* spp. CV. Tifton – 85. R. Bras. Ci. Solo, 27:451-459, 2003.
- ANDREOLI, C.V. & PEGORINI, E.S. Plano de reciclagem agrícola de lodo de esgoto do município de Maringá. Curitiba, Sanepar, 1999. 100p.
- ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.V. & FERNANDES, F. Resíduos Sólidos do Saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. Curitiba, Rima, 2001. 285p.
- ANJOS, A.R.M. & MATTIAZZO, M.E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em Latossolos repetidamente tratados com biossólido. Sci. Agric., 57:769-776, 2000.
- BARROW, N.J. Mechanisms of sorption of zinc in soil and soil components. In: ROBSON, A. D., ed. Zinc in soils and plants. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1993. p.15-31.
- BERTI, W.R. & JACOBS, L.W. Chemistry and phytotoxicity of soil trace elements from repeated sewage sludge applications. J. Environ. Qual., 25:1025-1032, 1996.
- BERTON, R.S.; VALADARES, J.M.A.S.; CAMARGO, O.A. & BATAGLIA, O.C. Peletização do lodo de esgoto e adição de CaCO<sub>3</sub> na produção de matéria seca e absorção de Zn, Cu, e Ni pelo milho em três Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 21:685-691, 1997.
- 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.
- CHANEY, R.L. & RYAN, J.A. Toxic metals and toxic organics compounds in MSW - Composts: research results on phyto-availability, bioavailability, fate, etc. In: HOITINK, H.A. & KEENER, H.M., eds. Science and engineering of composting: Design, environmental, microbiological and utilization aspects. Worthing: Renaissance Publication, 1993. p.451-506.
- CHANG, A.C.; HINELSY, T.D.; BATES, T.E.; DONER, H.E.; DOWDY, R.H. & RYAN, J.A. Effects of long-term sludge application on accumulation of trace elements by crops. In: PAGE, A.L.; LOGAN, T.G. & RYAN, J.A. Land application of sludge. Chelsea, Lewis Publishers, 1987. p.53-66.
- CHAO, T.T. & ZHOU, L. Extraction techniques for selective dissolution of amorphous iron oxides from soils and sediments. Soil Sci. Soc. Am. J., 47:224-232, 1983.
- DEFILIPPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Metodologia. 2.ed. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- ESTADOS UNIDOS - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Title 40 CFR – Part 503. Final rules: Standards for the use or disposal of sewage sludge. Federal Register, 58:9387-9415, 1993.
- ESTADOS UNIDOS - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Method 305 2: microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Washington, 1996. CD-Rom
- GOMES, S.B.V. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante para cultura do milho: avaliação agrônômica e impacto ambiental. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2004. 57p. (Tese de Mestrado)
- KIEHL, E.J. Fertilizantes orgânicos. São Paulo, Agronômica Ceres, 1985. 492p.
- LANTMANN, A.F. & MEURER, E.J. Estudos da eficiência de extratores para avaliação do zinco disponível do solo para o milho. R. Bras. Ci. Solo, 6:131-135, 1982.
- LINDSAY, W.L. & NORVELL, W.A. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J., 42:421-428, 1978.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas - princípios e aplicações. Piracicaba, Potafos, 1989. 201p.
- MEHLICH, A. MEHLICH-3 Soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. Comm. Soil Sci. Plant. Anal., 15:1409-1416, 1984.
- NASCIMENTO, C.W.A.; FONTES, R.L.F.; NEVES, J.C.L. & MELÍCIO, A.C.F.C. Fracionamento, dessorção e extração química de zinco em Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 26:599-606, 2002.
- NASCIMENTO, C.W.A.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C & OLIVEIRA, A.B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. R. Bras. Ci. Solo, 28:385-392, 2004.
- NASCIMENTO, C.W.A & FONTES, R.L.F. Correlações entre características de latossolos e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. R. Bras. Ci. Solo, 28:965-971, 2004.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NYAMANGARA, J. & MZEZEWA, J. The effect of long-term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loan soil under pasture grass in Zimbabwe. Agric. Ecos. Environ., 73:199-204, 1999.
- OLIVEIRA, M.F.G.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C. L.; VASCONCELOS, C.A. & ALVES, J.C.L. Relação entre o zinco “disponível”, por diferentes extratores, e as frações de zinco em amostras de solos. R. Bras. Ci. Solo, 23:827-836, 1999.
- OLIVEIRA, F.C. & MATTIAZZO, M.E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo Amarelo Distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. Scientia Agricola, 58:807-812, 2001.
- RAPPAPORT, B.D.; MARTENS, D.C.; RENEAU Jr., R.B. & SIMPSON, T.W. Metal availability in sludge-amended soils with elevated metals levels. J. Environ. Qual., 17:42-47, 1988.



- SHUMAN, L.M. The effect of soil properties on zinc adsorption by soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 39:454-458, 1975.
- SHUMAN, L.M. Fractionation method for soil microelements. *Soil Sci.*, 140:11-22, 1985.
- SHUMAN, L.M. Effect of liming on the distribution of manganese, copper, iron, and zinc among soil fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1236-1240, 1986.
- SILVEIRA, M.L.A. Extração seqüencial e especiação iônica de zinco, cobre e cádmio em Latossolos tratados com biossólido. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2002. 166p. (Tese de Doutorado)
- XIANG, H.F.; TANG, H.A. & YING, Q.H. Transformation and distribution of forms of zinc in acid, neutral and calcareous soils of China. *Geoderma*, 66:121-135, 1995.