



DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p505-511>

Metais pesados no solo e mamoneira adubada com bio sólido e silicato de cálcio e magnésio

Altina L. Nascimento¹, Geraldo R. Zuba Junio², Reginaldo A. Sampaio²,
Luiz A. Fernandes², João P. Carneiro² & Cristiane F. Barbosa²

¹ Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. E-mail: altinalacerda@yahoo.com.br (Autora correspondente)

² Instituto de Ciências Agrárias/Universidade Federal de Minas Gerais. Montes Claros, MG. E-mail: juniozuba@yahoo.com.br; rsampaio@ufmg.br; larnaldo@ufmg.br; jpauloagro@yahoo.com.br; crisfbps@gmail.com

Palavras-chave:

lodo de esgoto
compostagem
adubação orgânica
resíduos de siderurgia

RESUMO

O bio sólido é excelente fonte de nutrientes de plantas; entretanto, pode contaminar o solo. O trabalho teve por objetivo avaliar a influência da adubação com composto de lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio, nos teores de metais pesados no solo e em plantas de mamona. O experimento foi conduzido no Instituto de Ciências Agrárias da UFMG em Montes Claros, MG, no período de junho a dezembro de 2010. O cultivo foi realizado em área de Cambissolo Háptico utilizando-se a mamona (*Ricinus communis* L.) variedade BRS Energia. O delineamento foi em blocos casualizados em arranjo fatorial 2 x 4, com 3 repetições, sendo 2 doses de silicato de cálcio e magnésio (0 e 1 t ha⁻¹) e 4 doses de composto de lodo de esgoto (0; 23,81; 47,62 e 71,43 t ha⁻¹, em base seca). Não houve interação entre as doses de silicato de cálcio e composto de lodo de esgoto, bem como o silicato de cálcio e magnésio não influenciou os teores de metais pesados no solo e na planta. No solo os teores de Zn e Cu aumentaram com o incremento das doses de composto de lodo de esgoto sendo que Ni, Pb, Cd e Cr não foram influenciados pela aplicação deste resíduo. Na planta com aumento das doses de composto de lodo de esgoto houve aumento apenas nos teores de Cd e Pb.

Key words:

sewage sludge
composting
organic fertilization
steel waste

Heavy metals in soil and castor bean fertilized with biosolids and magnesium and calcium silicate

ABSTRACT

Biosolids are an excellent source of plant nutrients; however, it can contaminate the soil. The aim of this work was to assess the influence of the fertilization with sewage sludge compost and calcium and magnesium silicate on the levels of heavy metals in soil and in castor plants. The experiment was conducted at the Institute of Agrarian Sciences (ICA) of UFMG in Montes Claros, MG, from June to December 2010. The cultivation was carried out in area of Inceptisol, using the castor bean plant (*Ricinus communis* L.) variety BRS energy. The experiment was conducted in randomized blocks, in factorial scheme 4 x 2, with 3 replications consisting of 2 doses of calcium and magnesium silicate (0 and 1 t ha⁻¹) and 4 doses of sewage sludge compost (0; 23.81; 47.62 and 71.43 t ha⁻¹, on dry weight basis). There was no interaction between the doses of calcium silicate and sewage sludge compost, as well as, the calcium and magnesium silicate did not influence the levels of heavy metals in soil and plant. In soil, the levels of Zn and Cu increased with the increase in dose of sewage sludge compost, however Ni, Pb, Cd and Cr were not influenced by the application of residue. In the plant, increasing dose of sewage sludge compost increased only the Cd and Pb levels.

INTRODUÇÃO

Tendo em vista a maior valorização dos recursos naturais, tem ocorrido um acentuado aumento no volume de esgoto tratado no Brasil. O tratamento de esgotos gera, além de águas residuais com baixa carga poluidora, um resíduo denominado lodo de esgoto, composto por matéria orgânica, nutrientes e alguns elementos potencialmente tóxicos. A disposição adequada deste resíduo é um dos principais desafios a ser enfrentado pelos gestores ambientais (Galdos et al., 2004). Dentre os elementos potencialmente tóxicos se destacam os metais pesados que, além de contaminarem o solo e provocar redução na produtividade das culturas podem, se absorvidos pelas plantas, entrar na cadeia alimentar oferecendo riscos à saúde humana e animal.

Chiaradia et al. (2009) avaliaram os efeitos da aplicação de lodo de esgoto na cultura da mamona e constataram aumentos nos teores de Zn e Cu no solo mas tanto os teores no solo quanto na planta estiveram dentro dos limites aceitos pela legislação ambiental. Aumentos nos teores de metais pesados em solo adubado com lodo de esgoto também foram constatados por Nogueira et al. (2007), Chiba et al. (2008) e Bramryd et al. (2013). No entanto, Borges et al. (2004) verificaram que a maior parte dos metais presentes em solo adubado com lodo de esgoto se encontrava nas frações com ligações mais estáveis (ligados a óxidos e residual), tendo as frações trocável e orgânica apresentado a menor representatividade em relação ao total encontrado o que, em parte, diminui os riscos inerentes à utilização agrícola do resíduo.

O silício não é considerado elemento essencial para as plantas; entretanto, aumenta a resistência da planta a estresses bióticos, como patógenos e herbívoros, e a estresses abióticos tais como a seca, salinidade e toxicidade ou deficiência de nutrientes (Pilon-Smits et al., 2009). Liang et al. (2005) observaram que o silício promove redução no efeito tóxico de Cd em plantas de milho não somente pela imobilização do elemento no solo em razão da elevação do pH mas também por amenizar os efeitos tóxicos do elemento no interior da planta. De acordo com Gu et al. (2011) a aplicação de Si aumenta a estabilidade dos metais no solo por reduzir a passagem dos metais da fase sólida para a solução do solo. Esses autores observaram redução nos teores de Cd, Zn, Cu e Pb em solos que receberam aplicação de silício.

Considerando a possibilidade de aumento nos teores de metais pesados no solo com a aplicação do composto de lodo de esgoto (Galdos et al., 2004; Chiba et al., 2008; Trannin et al., 2008; Chiaradia et al., 2009), a associação entre lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio pode reduzir os prováveis efeitos tóxicos de tais elementos; além disto, o cultivo da mamona com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio pode reduzir os custos de produção e proporcionar destino adequado a esses resíduos diminuindo o impacto ambiental favorecido pela produção de adubos químicos e descarte inadequado. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar os teores de metais pesados no solo e na planta de mamona adubada com composto de lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em Montes Claros, MG, latitude 16° 51' 38" S e longitude 44° 55' 00" W. O cultivo foi realizado em área de Cambissolo Háplico cujas características químicas e físicas das camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade são apresentadas na Tabela 1. Foi utilizada a mamona (*Ricinus communis* L.) variedade BRS Energia como planta indicadora.

Os tratamentos em arranjo fatorial 2 x 4 corresponderam a 2 doses de silicato de cálcio e magnésio (0 e 1 t ha⁻¹) e 4 doses de composto de lodo de esgoto em base seca (0; 23,81; 47,62 e 71,43 t ha⁻¹), com três repetições, no delineamento em blocos casualizados.

O silicato de cálcio e magnésio utilizado foi um produto comercial contendo 36% de CaO, 9% de MgO e 23% de SiO₂, PRNT de 85% e teores de 27,2 mg kg⁻¹ de Fe, 19 mg kg⁻¹ de Zn, 43 mg kg⁻¹ de Mn e 19 mg kg⁻¹ de Cu, sendo a dose aplicada de 1 t ha⁻¹ a necessária para suprir Si para a planta (Korndörfer et al., 2002).

As doses de composto de lodo de esgoto foram baseadas na concentração de nitrogênio disponível neste resíduo, 1,68 kg t⁻¹, calculado de acordo com a resolução CONAMA 375 de agosto de 2006 (Brasil, 2006) e na recomendação da adubação da 5ª Aproximação da Recomendação de Corretivos e Fertilizantes de Minas Gerais, 40 kg ha⁻¹ (CFSEMG, 1999).

O lodo de esgoto desidratado foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto - ETE do município de Juramento - MG. A ETE é operada pela COPASA-MG e possui capacidade para tratar 217 m³ d⁻¹ de esgoto. A linha de tratamento é composta por tratamento preliminar e reator anaeróbio UASB interligado em série a uma lagoa de pós-tratamento do tipo facultativo e o tratamento do lodo é feito pelo processo de solarização em leito de secagem.

O composto de lodo de esgoto foi obtido pela compostagem misturando-se palha de feijão ao lodo de esgoto de forma a se obter uma relação C/N de 30:1. A compostagem foi

Tabela 1. Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento¹

Atributos do solo	Camada (cm)	
	0-20	20-40
pH em água	6,20	6,20
P-Mehlich (mg kg ⁻¹)	3,20	2,20
P-Remanescente (mg L ⁻¹)	33,80	30,80
K (mg dm ⁻³)	140,00	70,00
Ca (cmol _c dm ⁻³)	6,20	5,60
Mg (cmol _c dm ⁻³)	2,90	2,20
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00
Pb (mg dm ⁻³)	0,00	0,00
Cd (mg dm ⁻³)	0,00	0,00
Ni (mg dm ⁻³)	11,40	12,20
Zn (mg dm ⁻³)	0,90	0,80
Cu (mg dm ⁻³)	0,30	0,30
Cr (mg dm ⁻³)	0,00	0,00
SB (cmol _c dm ⁻³)	9,46	7,98
m (%)	0,00	0,00
T (cmol _c dm ⁻³)	12,05	10,43
V (%)	78,00	76,00
Matéria orgânica (dag kg ⁻¹)	5,58	4,79
Argila (dag kg ⁻¹)	22,00	24,00

¹Metodologias descritas por Tedesco et al. (1995)

preparada em sistemas de pilhas com altura de 1,5 m sendo que a temperatura e a umidade foram verificadas com frequência diária. Para o controle da temperatura foi realizado o revolvimento das pilhas de forma manual.

Na Tabela 2 são apresentadas as características químicas do lodo de esgoto, da palha de feijão e do composto de lodo de esgoto.

A adubação foi realizada em uma única aplicação, em sulcos de plantio, utilizando-se somente o silicato de cálcio e magnésio e o composto de lodo de esgoto, conforme os tratamentos. Colocaram-se três sementes em cada local de semeio considerando uma distância de 0,50 m entre plantas e 0,75 m entre fileiras; aos 15 dias após a semeadura foi realizado o desbaste deixando-se apenas uma planta em cada local de semeio; cada unidade experimental foi formada por 28 plantas, sendo 10 na parcela útil.

No início do florescimento da cultura, aproximadamente 45 dias após a emergência das plântulas, coletou-se a 4ª folha a partir do ápice das plantas da área útil da parcela para análise das concentrações de Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb (Tedesco et al., 1995; Malavolta et al., 1997). Após a colheita, aos 150 dias do plantio, coletou-se, no sulco de plantio onde foi realizada a adubação, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, em quatro pontos da parcela útil, 16 sub-amostras de solo por parcela, para formarem amostras compostas, para análises dos teores totais de Zn, Cu, Cd, Cr, Ni e Pb (EMBRAPA, 1997). Para identificação e quantificação dos metais utilizou-se espectrofotômetro de absorção atômica da marca Varian (AA240FS) com LQ, em mg L⁻¹, de 0,75 (Zn); 2,00 (Cu); 0,60 (Cd); 7,50 (Cr); 2,00 (Ni) e 5,00 (Pb), e soluções padrão de cada metal da Sigma-Aldrich (St. Louis, USA), todas preparadas em água ultra pura.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância aplicando-se o teste F a 0,05 de probabilidade. As doses de composto de lodo de esgoto foram ajustadas a modelos de regressão testando-se os coeficientes até 0.10 de probabilidade pelo teste t.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora tenham sido aplicados via composto de lodo de esgoto, os metais pesados Cd e Cr não foram detectados no solo por meio do método de análise utilizado, também a concentração dos metais no composto de lodo de esgoto não ultrapassou a concentração máxima permitida em produto derivado do lodo de esgoto (Brasil, 2006) e a quantidade de metais aplicada no solo foi menor que a carga acumulada teórica permitida pela resolução CONAMA nº 375, de agosto de 2006 (Brasil, 2006).

Os resultados das análises de variâncias indicaram que não houve interação entre as doses de silicato de cálcio e magnésio e o composto de lodo de esgoto em relação às variáveis analisadas ($p > 0,05$), bem como o silicato de cálcio e magnésio não influenciou os teores de metais pesados no solo (Tabela 3), apesar de conter tais elementos em sua composição. Tal fato pode ser explicado pelo pH do solo, da ordem de 6,20, o qual pode ter sido restritivo à solubilização do silicato. Conforme descrito em Korndörfer et al. (1999), em pH mais próximo da neutralidade há uma diminuição do grau de ionização de silicatos, o que influencia sua solubilidade.

Prates (2010) observou que a aplicação de 1 t ha⁻¹ de silicato de cálcio e magnésio não influenciou os teores de Cu e Pb no solo; entretanto, este autor constatou aumentos nos teores de Ni e Zn; por outro lado, Prado & Natale (2004) verificaram redução nos teores de Cu e Zn devido à aplicação de silicato de cálcio no solo.

Tabela 3. Teores de metais pesados no solo em resposta à adubação com silicato de cálcio e magnésio e composto de lodo de esgoto

Metal pesado (mg dm ⁻³)	Dose de silicato (t ha ⁻¹)	Dose de composto de lodo de esgoto (Mg ha ⁻¹)				Média
		0	23,81	47,62	71,43	
Zn (0-10 cm)	0	1,33	5,60	7,17	12,73	6,71 A
	1	1,47	5,03	7,17	11,33	6,25 A
Zn (10-20 cm)	0	1,03	1,70	2,20	3,77	2,18 A
	1	1,13	3,27	3,43	4,17	3,00 A
Zn (20-40 cm)	0	0,57	0,57	1,03	1,43	0,90 A
	1	0,60	0,63	0,93	1,33	0,87 A
Zn (40-60 cm)	0	0,40	0,47	0,57	0,77	0,55 A
	1	0,33	0,50	0,63	0,93	0,60 A
Cu (0-10 cm)	0	0,70	0,90	1,00	1,10	0,93 A
	1	0,60	0,80	0,70	1,20	0,83 A
Cu (10-20 cm)	0	0,87	0,83	0,90	0,97	0,89 A
	1	0,63	0,87	0,80	0,87	0,79 A
Cu (20-40 cm)	0	0,80	0,73	0,67	1,07	0,82 A
	1	0,83	0,93	0,90	1,03	0,92 A
Cu (40-60 cm)	0	0,70	0,60	0,80	0,70	0,70 A
	1	0,60	0,60	0,70	0,80	0,68 A
Ni (0-10 cm)	0	0,57	0,40	0,23	0,80	0,50 A
	1	0,80	0,87	0,93	0,57	0,79 A
Pb (0-10 cm)	0	4,67	6,33	3,23	5,83	5,02 A
	1	4,40	7,53	4,17	5,87	5,49 A
Pb (10-20 cm)	0	4,67	7,03	4,17	5,37	5,31 A
	1	5,37	5,37	5,37	4,43	5,14 A
Pb (20-40 cm)	0	4,43	6,80	5,60	5,83	5,67 A
	1	7,27	8,23	7,27	5,13	6,98 A
Pb (40-60 cm)	0	3,23	5,63	7,03	4,17	5,02 A
	1	6,57	7,73	6,83	4,67	6,45 A

Para cada variável, médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste F a 0,05 de probabilidade

Tabela 2. Características químicas do lodo de esgoto, da palha de feijão e do composto de lodo de esgoto e quantidades de nutrientes aplicadas com as diferentes doses de composto de lodo de esgoto

Material	Características químicas ¹ (mg kg ⁻¹)						
	Zn	Cu	Cd	Cr	Ni	Pb	N _{disp}
Lodo de esgoto	162,33	90,00	1,14	548,33	105,67	162,00	-
Palha de feijão	16,00	2,50	0,00	0,00	1,00	40,00	-
Composto de lodo de esgoto	304,33	81,67	1,84	740,67	116,00	151,33	-
Composto de lodo de esgoto (Mg ha ⁻¹)	Quantidades aplicadas (kg ha ⁻¹)						
23,81	7,25	1,94	0,04	17,64	2,76	3,60	40,00
47,62	14,49	3,89	0,09	35,27	5,52	7,21	80,00
71,43	21,74	5,83	0,13	52,91	8,29	10,81	120,00

¹Tedesco et al. (1995); N_{disp} = Teor de nitrogênio disponível calculado de acordo com a resolução CONAMA 375 de agosto de 2006 (Brasil, 2006)

À exemplo do observado no solo, o metal pesado Cr não foi detectado no limbo foliar nem no pecíolo da mamona, assim como o Ni, que embora tenha sido detectado no solo não foi, porém, detectado na planta. Por outro lado, mesmo não tendo sido constatado Cd no solo, o elemento foi detectado tanto no pecíolo quanto no limbo foliar da mamona (Tabela 4). Apesar de a redução da disponibilidade de metais pesados em solo pela aplicação de silício ser relatada por autores como Liang et al. (2005) e Gu et al. (2011), nesta pesquisa a aplicação de silicato de cálcio e magnésio não alterou a disponibilidade de metais pesados no solo, o que refletiu nos teores de metais pesados no limbo foliar e no pecíolo da mamona que também não foram alterados (Tabela 4). Conforme já relatado, em razão do pH do solo ser da ordem de 6,2 pode ter havido baixa solubilidade do silicato, ocorrendo pouca liberação dos metais deste corretivo. Contrário ao constatado neste experimento, Prates (2010) verificou redução nos teores de Zn e Cu em plantas de pinhão-manso quando aplicado silicato de cálcio e magnésio no solo.

O aumento nas doses de lodo de esgoto resultou em aumento nos teores de Zn no solo (Tabela 5). Os maiores

Tabela 4. Teores de Zn, Cu, Ni, Cd, Pb na folha e no pecíolo de mamona adubada com composto de lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio

Metal pesado (mg dm ⁻³)	Dose de silicato (Mg ha ⁻¹)	Dose de composto de lodo de esgoto (Mg ha ⁻¹)				Média
		0	23,81	47,62	71,43	
Folha						
Zn	0	37,50	30,10	28,80	32,80	32,30 A
	1	36,80	28,10	26,80	29,80	30,38 A
Cu	0	7,33	6,67	6,33	6,67	6,75 A
	1	7,00	6,67	6,33	5,67	6,42 A
Cd	0	5,00	7,67	8,67	7,00	7,09 A
	1	3,00	5,67	4,00	5,67	4,59 A
Pb	0	41,00	34,67	39,00	43,33	39,50 A
	1	45,33	42,00	38,67	37,67	40,92 A
Pecíolo						
Zn	0	34,10	29,50	31,80	25,50	30,23 A
	1	34,10	23,80	18,50	28,80	26,30 A
Cu	0	3,33	2,33	2,67	4,33	3,17 A
	1	3,33	2,67	3,00	2,67	2,92 A
Cd	0	7,67	7,67	6,33	4,33	6,50 A
	1	9,67	1,33	5,00	1,67	4,42 A
Pb	0	49,33	60,00	56,67	47,00	53,25 A
	1	45,00	52,67	46,33	45,00	47,25 A

Médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste F a 0,05 de probabilidade

teores do elemento foram observados na camada de 0-10 cm (11,54 mg dm⁻³) quando aplicados 71,43 t ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto. Com o aumento da profundidade observa-se redução nos teores de Zn; entretanto, considerando o ajuste linear das equações de regressão em todas as profundidades, a dose máxima aplicada resultou em maior teor do elemento no solo sendo nas profundidades 10-20, 20-40 e 40-60 cm constatados valores respectivos de 3,94; 1,40 e 0,85 mg dm⁻³.

De acordo com Galvão (2004), em solos cujos teores de Zn antes da implantação da cultura são classificados como baixo (0 – 0,9 mg dm⁻³), para o bom desenvolvimento da mamoneira deve-se aplicar 6 kg ha⁻¹ de Zn. Considerando os teores de Zn no composto de lodo de esgoto e as doses aplicadas de 23,41; 47,62 e 71,43 t ha⁻¹ do resíduo, foram adicionadas, ao solo, quantidades respectivas de 7,25, 14,49 e 21,74 kg ha⁻¹ (Tabela 2), o que resultou na correção da deficiência do micronutriente no solo e também na alteração da classificação dos teores do mesmo, que passou a ser considerado alto, na camada de 0-20 cm, e médio, na camada de 20-40 cm (Galvão, 2004). Na camada de 40-60 cm, apesar de ter ocorrido aumento nos teores de Zn com as doses de lodo de esgoto, os teores ainda foram considerados baixos, mesmo na maior dose aplicada. Aumento nos teores de Zn no solo em razão da aplicação de lodo de esgoto tem sido constantemente relatado na literatura (Galdos et al., 2004; Rangel et al., 2004; Oliveira et al., 2005; Marques et al., 2007; Chiaradia et al., 2009; Zuba Junio et al., 2011) e segundo Haynes et al. (2009), os teores de Zn, tal como os teores de Cu em lodo de esgoto, geralmente podem atingir valores inaceitáveis para utilização agrícola do resíduo.

Galvão (2004) destaca que os teores de Cu no solo de 0 a 0,5 mg dm⁻³ são classificados como baixo e para correção da deficiência do micronutriente para o cultivo da mamona deve-se aplicar 2 kg ha⁻¹ de Cu. Com as doses de lodo de esgoto foram adicionadas, ao solo, quantidades respectivas de 0; 1,94; 3,89 e 5,83 kg ha⁻¹ do elemento (Tabela 2), que resultou em aumento nos teores de Cu na camada de 0-40 cm, alterando a classificação agrônômica para alto, segundo Galvão (2004) (Tabela 5). Na camada de 40-60 cm de profundidade não foi observada influência da aplicação do composto de lodo de esgoto sobre os teores de Cu indicando baixo risco de contaminação das águas subterrâneas por Cu. Corroborando com esses resultados, Chiaradia et al. (2009) avaliaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto na cultura da mamona e constataram aumento nos teores

Tabela 5. Equações de regressão relacionando os teores de metais no solo adubado com composto de lodo de esgoto

Metal	Equação	R ²	DL (Mg ha ⁻¹)	TMS (mg dm ³)	TMS (kg ha ⁻¹)		Limite ¹
Zn (0 - 10)	Y = 1,42 + 0,141705***X	0,9741	71,43	11,54	11,54		
Zn (10 - 20)	Y = 1,24 + 0,037841***X	0,9552	71,43	3,94	3,94		445
Zn (20 - 40)	Y = 0,56 + 0,000164**X ²	0,9865	71,43	1,40	1,40		
Zn (40 - 60)	Y = 0,40 + 0,000089***X ²	0,9860	71,43	0,85	0,85		
Cu (0 - 10)	Y = 0,66 + 0,006342***X	0,9071	71,43	1,11	1,11		
Cu (10 - 20)	Y = 0,77 + 0,002142*X	0,8862	71,43	0,92	0,92		137
Cu (20 - 40)	Y = 0,79 + 0,00000065°X ³	0,8019	71,43	1,03	1,03		
Cu (40 - 60)	Y = Ym = 0,69	-	-	0,69	0,69		
Ni (0 - 10)	Y = Ym = 0,64	-	-	0,64	0,64		420
Pb (0 - 10)	Y = Ym = 5,25	-	-	5,25	5,25		
Pb (10 - 20)	Y = Ym = 5,23	-	-	5,23	5,23		41
Pb (20 - 40)	Y = Ym = 6,32	-	-	6,32	6,32		
Pb (40 - 60)	Y = Ym = 5,73	-	-	5,73	5,73		

DL - Dose de composto de lodo de esgoto para atingir maior concentração de metal pesado no solo; TMS - Teor máximo de metal pesado no solo; Ym - Valor médio; ¹Resolução CONAMA 375, 0, *, **, ***Significativos a 10; 5; 1 e 0,1 de probabilidade pelo teste t, respectivamente

de Cu no solo, inferindo que este elemento seria o primeiro a limitar a aplicação do lodo de esgoto no solo, pois a quantidade aplicada, considerando a necessidade de N requerida pela cultura da mamona, atingiria a carga acumulada teórica permitida para substâncias inorgânicas pela resolução CONAMA 375 (Brasil, 2006) em 72 anos. Nas condições do presente experimento, considerando a aplicação de 23,41 t ha⁻¹, a carga acumulada teórica permitida seria atingida em aproximadamente 71 anos. Aumento nos teores de Cu pela aplicação de lodo de esgoto também foi relatado por Galdos et al. (2004), Rangel et al. (2004) e Zuba Junio et al. (2011).

O aporte de Pb e Ni no solo com a aplicação das doses 0, 23,41; 47,62 e 71,43 t ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto foi de 0; 3,60; 7,21 e 10,81 kg ha⁻¹ de Pb e 0; 2,76; 5,52 e 8,29 kg ha⁻¹ de Ni; entretanto, não foi constatada influência dos tratamentos nos teores desses elementos em nenhuma das profundidades avaliadas e a presença de Ni foi detectada apenas na camada de 0-10 cm (Tabela 5). Mesmo não tendo sido detectada influência dos tratamentos nos teores desses elementos ressalta-se que, considerando a dose de 23,41 t ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto (dose que fornece a quantidade de N disponível requerida pela cultura) a carga acumulada teórica permitida pela resolução CONAMA 375 (Brasil, 2006) seria atingida com 11 e 26 aplicações de lodo de esgoto para Pb e Ni, respectivamente. E ainda quando considerada a dose de composto de lodo de esgoto que gerou maior produtividade (71,43 t ha⁻¹), este limite seria ultrapassado com 4 e 9 aplicações para Pb e Ni, respectivamente.

Evidencia-se, assim, a necessidade de avaliação criteriosa quanto à disponibilidade de metais pesados em lodo de esgoto quando destinado à agricultura, principalmente em doses mais elevadas e aplicações sucessivas. Contrário ao constatado neste experimento, Galdos et al. (2004) observaram aumento nos teores de Ni no solo e Marques et al. (2007) verificaram aumento nos teores de Ni e Pb no solo em razão da aplicação de lodo de esgoto.

Embora com a maior dose de composto de lodo de esgoto a quantidade de Zn adicionada tenha sido 3 vezes superior à recomendada e tenha ocorrido aumento linear na disponibilidade de Zn no solo com as doses de composto de lodo de esgoto, ocorreu redução nos teores de Zn no pecíolo das plantas de mamona enquanto no limbo foliar não foi constatada influência dos tratamentos (Tabela 6) e os valores permaneceram dentro da faixa considerada adequada, de acordo com Oliveira (2004).

Esses resultados corroboram os obtidos por Chiaradia et al. (2009) que, apesar de constatarem que ocorre aumento nos teores de Zn em solos adubados com lodo de esgoto, não verificaram influência deste aumento na absorção de Zn por plantas de mamona e ainda observaram teores de 32,1 mg kg⁻¹ no tecido foliar, valor este muito próximo dos 31,33 mg kg⁻¹ encontrados no presente experimento. Porém, Prates (2010) constatou, avaliando os teores de metais pesados em plantas de pinhão-mansão adubadas com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio cultivadas em solo semelhante ao do presente experimento, que o aumento da disponibilidade de Zn no solo provocado pela aplicação de lodo de esgoto resultou em aumento nos teores do elemento, tanto no limbo foliar quanto no pecíolo das plantas. Aumento nos teores de Zn no tecido foliar de plantas cultivadas em solos adubados com lodo de esgoto também foi observado por Gomes et al. (2006; 2007) e Zuba Junio et al. (2011). Chaves et al. (2010) constataram que a cultura da mamona pode ser considerada acumuladora do metal.

Os teores de Cu na folha e no pecíolo de plantas de mamona não foram influenciados pela aplicação de composto de lodo de esgoto (Tabela 6), mesmo tendo a disponibilidade do elemento no solo, que antes da instalação do experimento era considerada baixa, atingido valores considerados altos na profundidade de 0-40 cm após aplicação do resíduo e sendo a mamona capaz de acumular Cu na parte aérea quando ocorre aumento da disponibilidade do elemento (Chaves et al., 2010). Os Teores de Cu observados na folha são considerados nutricionalmente adequados, conforme Oliveira (2004). Chiaradia et al. (2009) não observaram aumento nos teores foliares de Cu em plantas de mamona cultivadas em solo adubado com lodo de esgoto; entretanto, Prates (2010) verificou que a aplicação de lodo de esgoto influencia os teores de Cu em folhas e em pecíolo de pinhão-mansão.

Embora não tenha sido detectado no solo, o Cd foi o único elemento que teve seus teores alterados no limbo foliar em razão da aplicação de composto de lodo de esgoto (Tabela 6). Com o incremento das doses do resíduo houve aumento nos teores deste elemento no limbo foliar, de 4,37 mg kg⁻¹ nas plantas não adubadas para 6,82 mg kg⁻¹ com a aplicação de 71,43 kg ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto; contudo, o aumento da dose de composto de lodo de esgoto resultou em redução nos teores de Cd no pecíolo das plantas de mamona sendo que os teores médios calculados de acordo com a equação ajustada foram de 7,87 e 3,45 mg kg⁻¹ na menor e

Tabela 6. Equações de regressão relacionando os teores de metais pesados na folha de mamona adubada com composto de lodo de esgoto

Nutriente	Equação	R ²	DL (Mg ha ⁻¹)	Adequado ¹	
				TMP (mg dm ³)	
Folha					
Zn	Y = Ym = 31,33	-	-	31,33	15-40
Cu	Y = Ym = 6,59	-	-	6,59	4-10
Cd	Y = 4,37 + 0,289295*X ^{0,5}	0,7447	71,43	6,82	-
Pb	Y = Ym = 40,20	-	-	40,20	-
Pecíolo					
Zn	Y = 33,12 - 0,962361*X ^{0,5}	0,7789	-	31,16	-
Cu	Y = Ym = 3,03	-	-	3,03	-
Cd	Y = 8,46 - 0,592837*X ^{0,5}	0,8223	0	7,87	-
Pb	Y = 47,86 + 0,424612*X - 0,006438*X ²	0,8671	32,98	54,86	-

DL - Dose de composto de lodo de esgoto para atingir maior concentração de nutriente na planta; TMP - Teor máximo de metal na planta; ¹Faixa de suficiência de nutrientes na planta, de acordo Oliveira (2004)

na maior dose testada, respectivamente, fato que pode ter ocorrido em razão do aumento da produção de biomassa do pecíolo com o incremento das doses do composto causando diluição do elemento na planta. Os valores de Cd observados neste experimento estão acima do relatado por Zeitouni et al. (2007) em mamona cultivada em solo enriquecido com o elemento (0,11-3,05 mg kg⁻¹).

A concentração de Pb no limbo foliar não foi influenciada pela aplicação do composto de lodo de esgoto; assim, plantas cultivadas em parcelas que receberam a maior dose do resíduo apresentaram concentração de Pb no limbo foliar semelhante àquelas cultivadas em parcelas não adubadas (Tabela 6); todavia, a aplicação de lodo de esgoto influenciou a concentração de Pb no pecíolo das plantas, com ajuste de equação quadrática cuja máxima concentração do elemento de 54,86 mg kg⁻¹ foi atingida quando aplicados 32,98 kg ha⁻¹ de composto de lodo de esgoto, sendo que a redução da concentração de Pb no pecíolo nas maiores doses de composto pode estar relacionada ao aumento da produção de biomassa deste órgão. Prates (2010) não detectou, avaliando plantas de pinhão-manso adubadas com lodo de esgoto, a presença de Pb no tecido foliar e a redução nos teores de Pb em razão da aplicação de lodo de esgoto foi observada por Rangel et al. (2006) em plantas de milho.

CONCLUSÕES

1. O silicato de cálcio e magnésio não influencia os teores de metais pesados no solo nem em plantas de mamona.
2. As doses de composto de lodo de esgoto aumentam os teores totais de Zn e Cu no solo.
3. Os teores de Cd no limbo foliar e de Pb no pecíolo da mamona aumentam com a aplicação de composto de lodo de esgoto no solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus maiores agradecimentos à Fapemig e ao CNPq, pelo apoio financeiro, que possibilitou a realização deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- Borges, M. R.; Coutinho E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido. I – fracionamento. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.543-555, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300015>
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Resolução n. 375 de 29 de agosto de 2006. <http://www.mma.gov.br/conama/>. 01 Nov. 2009.
- Bramryd, T. Long-term effects of sewage sludge application on the heavy metal concentrations in acid pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in a climatic gradient in Sweden. Forest Ecology and Management, v.289, p.434-444, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.045>
- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª aproximação. Viçosa: CFSMG, 1999. 359p.
- Chaves, L. H. G.; Mesquita, E. F.; Araujo, D. L. ; França, C. P. Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoneira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. Engenharia Ambiental, v.7, p.263-277, 2010.
- Chiaradia J. J.; Chiba M. K.; Andrade, C. A.; Oliveira, C.; Lavorenti A. Produtividade e nutrição de mamona cultivada em área de reforma de canal tratado com lodo de estoto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.701-709, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000300022>
- Chiba, M. K.; Mattiazzo, M. E.; Oliveira, F. C. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto. II - Fertilidade do solo e nutrição da planta. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.653-662, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200020>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 1997. 212p.
- Galdos, M. V.; Maria, I. C. de.; Camargo, O. A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutroférrico tratado com lodo de esgoto Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.569-577, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300017>
- Galvão, E. Z. Micronutrientes. In: Souza, D. M. G.; Lobado, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.8, p.185-226.
- Gomes, S. B. V.; Nascimento, C. W. A.; Biondi, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, p.459-465, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000500002>
- Gomes, S. B. V.; Nascimento, C. W. A.; Biondi, C. M.; Accioly, A. M. A. Distribuição de metais pesados em plantas de milho cultivadas em Argissolo tratado com lodo de esgoto. Ciência Rural, v.36, p.1689-1695, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000600004>
- Gu, H.; Qiu, H.; Tian, T.; Zhan, S.; Deng, T.; Chaney, R. L.; Wang, S., Tang, Y.; Morel, J.; Qiu, R. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. Chemosphere, v.83, p.1234-1240, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.014>
- Haynes, R. J.; Murtaza, G.; Naidu, R. Inorganic and organic constituents and contaminants of biosolids: Implications for Land Application. Advances in Agronomy, v.104, p.165-237, 2009. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(09\)04004-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(09)04004-8)
- Korndörfer, G. H.; Arantes, V. A.; Corrêa, G. F.; Snyder, G. H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.23, p.635-641, 1999. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000300017>
- Korndörfer G. H.; Pereira, H. S.; Camargo, M. S. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. Uberlândia: UFU/ICAG, 2002. 23p.
- Liang, Y.; Wong, J. W. C. Wei, L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. Chemosphere, v.58, p.475-483, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.034>
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed., Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

- Marques, M. O.; Nogueira, T. A. R.; Fonseca, I. M.; Marques, T. A. Teores de Cr, Ni, Pb e Zn em Argissolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.7, p.133-143, 2007.
- Nogueira, T. A. R.; Sampaio, R. A.; Fonseca, I. M.; Ferreira, C. S.; Santos, S. E.; Ferreira, L. C.; Gomes, E.; Fernandes, L. A. Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.331-338, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300014>
- Oliveira, K. W.; Melo, W. J.; Pereira, G. T.; Melo, V. P.; Melo, G. M. P. Heavy metals in oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. *Scientia Agrícola*, v.62, p.381-388, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162005000400012>
- Oliveira, S. A. Análise Foliar. In: Souza, D. M. G.; Lobado, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.10, p.245-255.
- Pilon-Smits, E. A.H.; Quinn, C. F.; Tapken, W.; Malagoli, M.; Schiavon, M. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion in Plant Biology*, v.12, p.267-274, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.009>
- Prado, R. M.; Natale, W. Aplicação do silicato de cálcio em Argissolo Vermelho no desenvolvimento de mudas de maracujazeiros. *Acta Scientiarum Agronomy*, v.26, p.387-393, 2004. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v26i4.1714>
- Prates, F. B. S. Crescimento, desenvolvimento e nutrição de pinhão manso adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. Montes Claros: UMFG, 2010. 94p. Dissertação Mestrado
- Rangel, O. J. P.; Silva, C. A.; Bettiol, W.; Dynia, J. F. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v.30, p.583-594, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000300018>
- Rangel, O. J. P.; Silva, C. A.; Bettiol, W.; Guilherme, L. R. G.; Dynia, J. F. Acúmulo de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em Latossolo Vermelho adubado com fontes de lodo de esgoto e cultivado com milho. *Ciência e Agrotecnologia*, v.28, p.15-23, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542004000100002>
- Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS. 174p. 1995. Boletim Técnico, 5.
- Trannin, I. C. B.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.223-230, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662008000300001>
- Zeitouni, C. F.; Berton, R. S.; Abreu, C. A. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. *Bragantia*, v.66, p.649-657, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052007000400015>
- Zuba Junio, G. R.; Sampaio, R. A.; Santos, G. B.; Nascimento, A. L.; Prates, F. B. S.; Fernandes, L. A. Metais pesados em milho fertilizado com fosfato natural e composto de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.1082-1088, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011001000013>