

Estudo preliminar dos teores de metais potencialmente tóxicos em solo após disposição de lodo in natura da estação de tratamento de água

B. L. M. Nascimento¹; J. D. de Oliveira²; S. S. Araújo²; G. dos S. Silva³; R. dos S. Bráz³

¹*Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental /Laboratório de Saneamento Ambiental/ Universidade Federal do Ceará, CEP: 60356-000, Fortaleza-CE, Brasil*

²*Departamento de Química e Biologia/ Laboratório de Química/ Centro de Estudos Superiores de Imperatriz, CEP: 65900-000 Imperatriz-MA, Brasil*

³*Departamento de Ciências do Solo/Laboratório de Física do Solo/, Universidade Federal do Ceará, CEP: 60356-000, Fortaleza-CE, Brasil*

brunoimpma@hotmail.com

(Recebido em 31 de março de 2013; aceito em 19 de dezembro de 2013)

Devido ao fato do lodo sofrer intensa influência antrópica o seu aproveitamento deve ser fonte de estudos, pois o mesmo apresenta quantidades significativas de metais potencialmente tóxicos e caso manejado incorretamente poderá contaminar o solo e a água no local de disposição. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação do lodo da estação de tratamento de água sobre as características químicas e nos níveis de metais potencialmente tóxicos de um solo de textura média. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com quatro tratamentos e quatro repetições, totalizando assim 16 unidades experimentais. Cada unidade experimental consiste em um vaso de polietileno preenchido com 6 kg do substrato (solo ou solo + lodo). O primeiro tratamento foi constituído apenas por solo, funcionando como testemunha. Os outros tratamentos foram constituídos de doses de lodo que correspondiam a 75, 150 e 250 kg lodo por ha⁻¹. O estudo foi desenvolvido no laboratório de química do CESI-UEMA. A adição do lodo promoveu alterações significativas em algumas propriedades químicas do solo, como CTC, matéria orgânica e pH. Essas alterações contribuíram para aumentar a fertilidade natural do solo em estudo. Nas condições estudadas os teores de cobre, chumbo e cromo estão dentro dos limites toleráveis destes metais em solos segundo critérios estabelecidos pela CETESB e pelo CONAMA.

Palavras-chave: Chumbo; Resíduo; Química do Solo.

Preliminary study of the levels of metals potentially toxic in soil after sludge disposal in natura of the station of water treatment

Due to the fact the sludge has intense influence anthropic, its use must be the source of study because it has significant quantities of metals potentially toxic and if it is handled incorrectly, it can contaminate the soil and the water at the disposal place. This way, the goal of this study was to evaluate the effect of the application of the sludge of the water treatment station on the chemical characteristics and on levels of metals potentially toxic from a medium textured soil. The experimental design used was completely randomized with four treatments and four repetitions, totaling 16 experimental units. The experimental units consisted of 1 polyethylene pot filled with 6 kg of substrate (soil or soil + sludge). The first treatment was filled to soil, functioning as a control. Other treatments consisted of sludge doses that corresponded to 75, 150 and 250 kg ha⁻¹ sludge by soil. The study was conducted at the chemical laboratory of CESI-UEMA. The addition of sludge promoted significant changes in chemical properties of the soil, for example CTC, organic matter and pH. These changes contributed to increase soil quality. Under the conditions studied, the levels of copper, lead and chromium are within the tolerable limits of these metals in soils according to criteria established by CETESB and CONAMA.

Keywords: Lead; Waste, Soil Chemistry

1. INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de água (ETAs) possuem a função principal de transformar a água bruta, oriunda de rios e lagos, em água potável disponível para o consumo humano. Para isso,

geralmente são utilizados processos físicos e químicos de coagulação, floculação, decantação e filtração. No decorrer desses mecanismos são lançados alguns componentes químicos e através dos processos de sedimentação e decantação é gerado um resíduo denominado de lodo de estação de tratamento de água (LETA) [1]. Teixeira e colaboradores [2] afirmam que o LETA é um resíduo formado nos decantadores da estação, resultante dos processos de floculação e coagulação, podendo ser definido também como uma mistura de poluentes, areia, silte, argila e substâncias húmicas.

O destino final desse resíduo erroneamente vem sendo os rios e lagos próximo das estações. No entanto, de acordo com a NBR 10.004/2004 [3] essa prática vai contra a preservação do meio ambiente. O uso agrônômico, portanto, poderá ser uma das alternativas encontradas para o aproveitamento desse resíduo, pois o mesmo apresenta elevadas concentrações de matéria orgânica, micro e macronutrientes [1]. Sotero-Santos e colaboradores [4] ressaltam que uma das principais preocupações em relação à disposição desse resíduo no ambiente refere-se ao potencial de toxicidade de ferro e alumínio, já que estes são utilizados no tratamento convencional da água. Além disso, algumas espécies metálicas como o cobre, zinco, níquel, chumbo, cádmio, crômio e manganês presentes no LETA, também possuem ações tóxicas que podem causar impactos no ambiente, ou até mesmo influenciar na disposição final e na reutilização desse resíduo [5].

Quando adicionados ao solo, os metais podem seguir caminhos diferentes como serem lixiviados e atingirem os lençóis freáticos ou até mesmo serem absorvidos pelas plantas [6]. Cabe ressaltar que esses elementos são bioacumulativos, ou seja, vão se acumulando nos organismos vivos podendo atingir níveis tóxicos lentamente. A adição de resíduos ao solo, portanto, deve ser feita com muita cautela. Diante disso, foi elaborada a seguinte hipótese para este trabalho: o lodo de ETA, quando disposto no solo, proporciona benefícios, mas também aumenta os níveis de metais potencialmente tóxicos.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de lodo da ETA sobre as características químicas e níveis de metais potencialmente tóxicos do solo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em casa de vegetação e no laboratório de Química do CESI/UEMA. O solo utilizado foi coletado na área de cultivo de olerícolas da INFRAERO, localizada no entorno do Aeroporto de Imperatriz-MA (5° 31' 32" S e 47° 26' 35" W), com altitude média de 92 m acima do nível do mar. O clima da região segundo a classificação de Koppen é do tipo (Am), tropical quente e úmido, com precipitações mal distribuídas e duas estações: chuva, que vai de dezembro a abril, e seca, que vai de maio a novembro. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a média pluviométrica anual é de 1463,5 mm, a do mês mais chuvoso (março) é de 279 mm e do mês mais seco (julho) de 6,4 mm.

A temperatura média anual é de aproximadamente 26,4 °C e a umidade relativa média do ar está em torno de 90%. As amostras de lodo foram coletadas nos tanques de decantação da estação de tratamento de água da companhia de saneamento ambiental (CAEMA) na cidade de Imperatriz-MA em dias de limpeza. O lodo foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar por 72 h a $\pm 60^{\circ}\text{C}$. O solo foi coletado a uma profundidade de 0-0,20 m em vários pontos para formar uma única amostra. Em seguida o solo foi transferido para bandejas plásticas e submetido à secagem por 48 h em temperatura ambiente. Decorrido o tempo de secagem, as amostras de lodo e solo foram desagregadas, fracionadas e peneiradas a 2 mm conforme Botero e colaboradores [1]. As principais características químicas do lodo e do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características químicas do lodo e solo antes da instalação do experimento.

Atributos		
	Lodo	Solo
pH (H ₂ O)	6,30	6,36
MO (g kg ⁻¹)	234,60	34,53
P (mg kg ⁻¹)	0,5	1,0
CE (dS m ⁻¹)	0,7	0,5
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	8,5	2,1
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	5,1	5,2
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,4	0,2
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,3	0,2
H ⁺ +Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	1,5	1,0
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,5	0,4
S (cmol _c kg ⁻¹)	14,3	7,7
CTC (cmol _c kg ⁻¹)	6,8	1,2
Cd (mg kg ⁻¹)	N.D	N.D
Cr (mg kg ⁻¹)	70,0	26,3
Cu (mg kg ⁻¹)	43,4	26,2
Pb (mg kg ⁻¹)	14,7	11,4
Fe (mg kg ⁻¹)	32705,0	2716,3

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 4 tratamentos e 4 repetições. A testemunha foi constituída apenas por solo, e os outros 3 tratamentos foram constituídos de doses de lodo que correspondiam a 75, 150 e 250 kg ha⁻¹ de solo. Os vasos foram irrigados em casa de vegetação durante 180 dias, mantendo o solo na capacidade de campo em torno de 80% utilizando água deionizada. Após esse período, os tratamentos foram encaminhadas para o laboratório de Química do CESI/UEMA para ser avaliado os atributos químicos e a concentração de metais potencialmente tóxicos.

Logo após a secagem, as amostras foram submetidas à análise de pH em água, relação 1:2,5, e determinação da matéria orgânica pelo método de extração em via úmida e titulação com sulfato ferroso amoniacal conforme descrito por Embrapa [7]. Para a determinação dos cátions totais trocáveis, CTC, foi pesado 2,0 g da amostra, adicionando-se 1 g de carvão ativado e 100 mL da solução de HCl 0,5 mol L⁻¹ e posteriormente submetido a filtração à vácuo de acordo com a metodologia proposta pelo Mapa [8].

Para determinar o teor total de cádmio, cobre, cromo, chumbo e ferro nas amostras foi utilizado o método proposto pela Usepa [9]. A quantificação desses metais foi determinada por espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS) e corretor de fundo com lâmpada de deutério, modelo Varian AA 240. Todas as amostras foram analisadas em triplicata.

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística de variância em função das doses de lodo. As médias das variáveis obtidas nas diferentes doses de lodo foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o software, Assistat versão 7.6 Beta 2011, conforme instruções de Silva & Azevedo [10] além de serem submetidas à análise de regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os dados da análise de variância inseridos na Tabela 2 foi possível observar que todas as variáveis analisadas sofreram efeito a 1% de probabilidade em função das doses de lodo aplicadas. Esse resultado indica que as doses de lodo alteraram os atributos do solo avaliados.

Tabela 2: Resumo da análise de Variância (ANOVA) para as variáveis analisadas em função das doses de lodo aplicadas.

	Teste F							
	pH	M.O	CTC	Cr ³⁺	Cu ²⁺	Cd ²⁺	Fe ²⁺	Pb ²⁺
Dose	56,18*	5110,42*	1653,20*	89,59**	875,48*	N.D	2145538,29	46047,70*
s	*	*	*	*	*		**	*

F = Estatística do teste F; ** = significativo ao nível de 1% de probabilidade; N.D = Não Detectado

Na Tabela 3 encontra-se o teste Tukey a 5% de probabilidade para as médias de todas as variáveis. Foram observadas diferenças significativas de pH entre o tratamento testemunha e as doses de lodo aplicadas, o que indica que a aplicação de lodo no solo tem forte tendência para causar redução do pH. Verificou-se também que tanto a testemunha quanto os tratamentos com doses crescentes de lodo apresentaram uma característica ácida considerada fraca, que segundo Ribeiro e colaboradores [11] variam de 6,10 a 6,90. Para a classificação agrônômica segundo Brady & Weil [12] as amostras em estudo revelaram um pH adequado para o cultivo, pois em solos com pH entre 6,0 e 6,5 ocorre maior disponibilidade de nutrientes para as plantas. O resultado observado pode ser atribuído à característica ácida do lodo, pois segundo Nascimento e colaboradores [13], lodos que apresentam caráter ácido, quando utilizado na adubação de plantas cultivadas, diminuem o pH do solo. De acordo com Bettiol e Fernando [14], o aumento da acidez do solo deve-se ao processo de nitrificação onde o amônio é oxidado a nitrito e nitrato com a produção líquida de dois íons de H⁺. Simonete e colaboradores [15] afirmam que a acidificação pode estar associada provavelmente também à oxidação de sulfitos e a produção de ácidos orgânicos durante a degradação dos resíduos por microrganismos presentes no lodo.

A análise de regressão que relaciona o pH do solo com as doses crescentes de lodo está representada na Figura 1. Verificou-se que os dados referentes ao pH do solo adequaram-se ao modelo quadrático de regressão, sendo que o aumento nas doses de lodo proporcionaram um leve decaimento no pH. Os elevados coeficientes de determinação encontrados na Figura 1 indicam que existe uma relação consistente e significativa entre o pH do solo e as doses de lodo aplicadas, comprovando assim o efeito desse resíduo nos atributos do solo.

Em relação à CTC, Tabela 3, pode-se observar que a testemunha apresentou uma CTC considerada baixa segundo a classificação utilizada pela Confederação de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais [11], a qual está dentro da faixa de 0,81-2,30 cmol_c kg⁻¹. Analisando a CTC do lodo, Tabela 1, foi possível constatar que o mesmo apresentou uma CTC considerada boa por está dentro da faixa de 4,61-8,0 cmol_c kg⁻¹ conforme Ribeiro e colaboradores [11]. Foi possível observar diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre a CTC do tratamento testemunha e a CTC dos tratamentos com doses de lodo. Sendo que a CTC sofreu um aumento nos tratamentos D1, D2 e D3, onde as aplicações de maiores doses (150 e 250 kg ha⁻¹) contribuíram para que o solo obtivesse as maiores CTC.

O resultado observado anteriormente referente ao aumento da CTC está relacionado com a matéria orgânica presente no lodo, a qual costuma alterar o complexo coloidal, criando cargas superficiais tendo como consequência o aumento da CTC [16]. Diante dos resultados encontrados, pode-se inferir que o solo tratado com o lodo de ETA possui maior capacidade de reter cátions e menor taxa de lixiviação, conseqüentemente maior facilidade de fornecer elementos como cálcio, magnésio e potássio para as plantas devido ao aumento na CTC do solo.

Portanto, o fato da CTC do solo ter aumentado deve-se à elevada quantidade de matéria orgânica presente no lodo disposto ao solo. O mesmo comportamento foi observado por Gomes e colaboradores [17] ao usarem o lodo de esgoto anaeróbico coletado de quatro leitos de secagem da ETE-Mangueira da Companhia Pernambucana de Saneamento-COMPESA e por Corrêa e colaboradores [18] ao utilizarem o lodo de esgoto da estação de tratamento de Brasília Sul do Distrito Federal.

A análise de regressão que relaciona a CTC do solo com as doses crescentes de lodo está representada na Figura 1. Verificou-se que os valores da CTC do solo em função das crescentes doses de lodo adequaram-se ao modelo quadrático de regressão, sendo que o aumento nas doses de lodo proporcionaram aumentos na CTC do solo. Os elevados coeficientes de determinação encontrados na Figura 1 indicam que o aumento da CTC está relacionado cerca de 95% com as doses de lodo aplicadas.

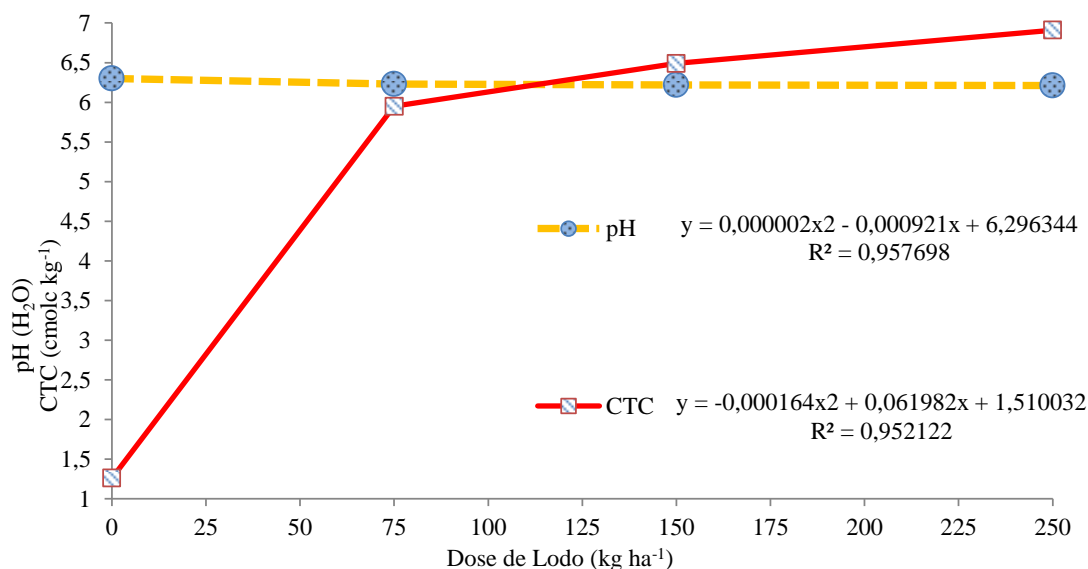


Figura 1: Efeito das doses crescentes de lodo sobre o pH e CTC do solo.

Ao verificar as características Químicas do lodo utilizado neste estudo, Tabela 1, foi possível observar que o mesmo apresenta elevado teor de matéria orgânica, sendo superior ao teor obtido no lodo da ETA de Jaboticabal-SP (200 g kg^{-1}). No entanto, esteve abaixo dos valores encontrados para o lodo da ETA de Taquaritinga-SP (325 g kg^{-1}) e o da ETA de Manaus-AM (689 g kg^{-1}) estudados por Botero e colaboradores [1]. Ao comparar os teores de matéria orgânica encontrados em lodos de outras regiões é possível verificar que as características das águas brutas influenciam fortemente nas características dos lodos. Barreira e colaboradores [19] afirmam que teores elevados de matéria orgânica não significam que o lodo seja de boa qualidade para fins agrônomo, no entanto, a composição da matéria orgânica e a concentração de nutrientes podem indicar a capacidade que o biossólido possui em alterar a fertilidade dos solos. Dentre os vários efeitos que a matéria orgânica pode proporcionar ao solo, os principais são: a redução da erosão, melhorias no armazenamento e fluxo de água, contribui para que o solo esteja menos compacto, funcionando também como fonte de carbono e energia para os microorganismos do solo [20].

Pode-se notar diferenças significativas no teor de matéria orgânica entre o tratamento testemunha e os tratamentos D1, D2 e D3 dispostos na Tabela 3. Com esse resultado, pode-se afirmar que a aplicação de doses crescentes de lodo contribuiu para elevar a matéria orgânica do solo, sendo que a maior dose foi a que mais contribuiu para o aumento dessa variável. Em relação à testemunha, os aumentos percentuais observados nas doses D1, D2, e D3 foram de 85, 109 e 155%, respectivamente. Abreu Júnior e colaboradores [21] ao utilizarem o lixo urbano, em uma área degradada de mineração, observaram também o aumento da matéria orgânica do solo com o aumento da aplicação do lixo.

Os dados da M.O do solo em função das doses crescentes de lodo adequaram-se aos modelos de regressão quadrática, resultando em um elevado coeficiente de determinação, o qual indica que o aumento na matéria orgânica do solo é determinado cerca de 97% pelo aumento das doses de lodo conforme demonstrado na Figura 2.

Segundo Bezerra e colaboradores [16] a maior influência da matéria orgânica nas propriedades químicas do solo está na alteração de seu complexo coloidal refletindo diretamente na CTC e promovendo aumento de cargas negativas e conseqüentemente uma maior retenção de cátions.

Tabela 3: Características químicas do solo em função do tratamento aplicado com doses crescentes de lodo

Atributos	Testemunha	D1	D2	D3	CV%
		75 kg ha ⁻¹	150 kg ha ⁻¹	250 kg ha ⁻¹	
pH (H ₂ O)	6,30a	6,23b	6,22b	6,23b	0,92
MO (g kg ⁻¹)	34,53d	64,10c	72,40b	88,33a	1,46
CTC (cmol _c kg ⁻¹)	1,26d	5,94c	6,48b	6,90a	1,97
Cd (mg kg ⁻¹)	N.D	N.D	N.D	N.D	-
Cr (mg kg ⁻¹)	26,30d	33,20c	55,90a	43,10b	0,86
Cu (mg kg ⁻¹)	26,20b	27,00b	30,90a	31,90a	1,20
Pb (mg kg ⁻¹)	11,40c	14,30a	14,90a	12,20b	1,39
Fe (mg kg ⁻¹)	2716,33d	6235,66c	7461,33b	12263,00a	0,28

CV%= Coeficiente de Variação; Médias seguidas da mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; N.D= Não Detectado

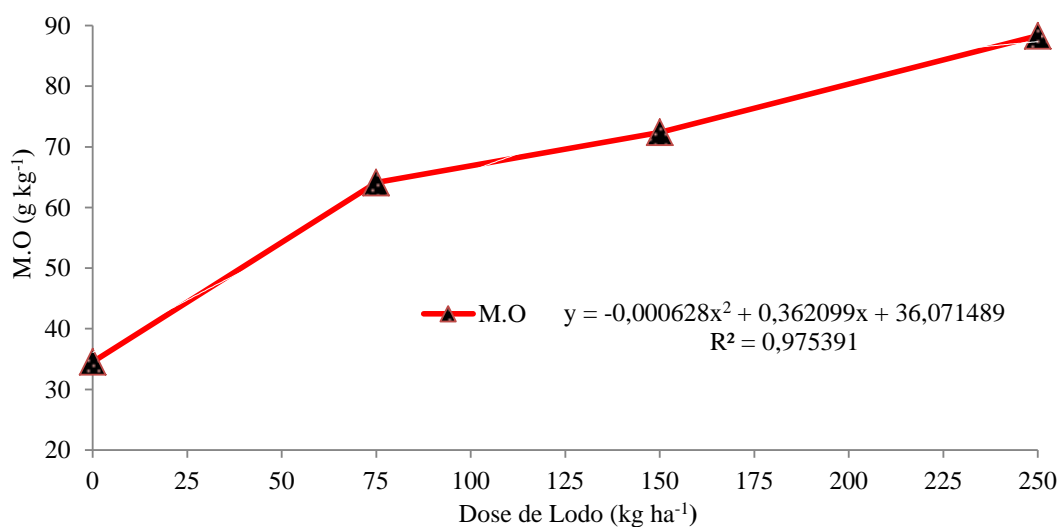


Figura 2: Efeito das doses crescentes de lodo sobre a Matéria orgânica (M.O.) do solo.

Botero e colaboradores [1] afirmam que os lodos de ETA em geral possuem quantidades significativas de espécies metálicas que podem gerar toxicidade ao ambiente, como o zinco, níquel, cobre, chumbo, cádmio, crômio e ferro. Nas Tabelas 1 e 3 encontram-se os teores de metais potencialmente tóxicos quantificados nas amostras de lodo, solo e tratamentos com lodo e solo.

O teor de cádmio nas amostras estudadas esteve abaixo do limite de detecção do equipamento, sendo assim, não foi possível realizar a quantificação desse metal. Verificou-se que a adição do lodo de ETA ao solo contribuiu para aumentar os teores de chumbo, crômio, cobre e ferro. Para o crômio, os aumentos percentuais verificados nas doses D1, D2 e D3, em relação à testemunha, foram de 26, 112 e 63%, respectivamente. Para o cobre, os aumentos percentuais só tiveram significância nas doses D2 e D3, em relação à testemunha, o que indica que a dose D1 não foi capaz de alterar a concentração de cobre do solo. Para o chumbo, os

aumentos percentuais verificados nas doses D1, D2 e D3, em relação à testemunha, foram de 25, 30 e 7%, respectivamente.

Em termos de aumento percentual, em relação à testemunha, o ferro foi o metal que mais foi influenciado pelo aumento nas doses de lodo no solo, o qual sofreu aumentos de 129, 174 e 351% nas doses D1, D2 e D3, respectivamente. Os dados da Tabela 3 demonstram que existem diferenças significativas a 5% pelo teste de Tukey entre os teores dos metais no solo tratado com doses crescentes de lodo e o tratamento testemunha, indicando que o lodo possui elevado potencial para aumentar a concentração de metais no solo.

Ao comparar os teores de metais encontrados no lodo utilizado neste estudo com os teores de lodos de esgotos de outras regiões do Brasil, pode-se perceber que os teores de chumbo, cromo e cobre encontrados neste trabalho estão abaixo dos teores mínimos encontrados por Oliveira [22], sendo esses de 119, 545 e 379 mg kg⁻¹, respectivamente.

O elevado teor de ferro presente no lodo utilizado neste trabalho pode ser explicado pela elevada concentração desse metal nas águas do rio Tocantins, o qual vem sofrendo intensos processos erosivos de suas margens, ou até mesmo devido ao uso de flocculantes químicos usados no tratamento convencional da água. Tsutiya e Hirata [23] afirmam que os lodos possuem características variadas que dependem das condições da água bruta, forma de limpeza dos decantadores, qualidade de produtos químicos utilizados no tratamento e suas dosagens. Embora a concentração de ferro do lodo da ETA de Imperatriz-MA tenha sido elevada, esse valor esteve abaixo da concentração de ferro (34554 mg ferro kg⁻¹) encontrada por Oliveira [22].

Os teores de cobre, cromo e chumbo encontrados no lodo, Tabela 1, estão abaixo dos limites máximos de contaminantes inorgânicos (1500, 1000 e 300 mg kg⁻¹ respectivamente) estabelecidos para lodos serem utilizados na agricultura conforme a resolução 375/2006 [24]. De acordo com Bell e colaboradores [25] a aplicação anual prolongada de lodo de esgoto ao solo pode tornar-se restritiva ao sistema de produção agrícola devido à possibilidade de causar enriquecimento de metais potencialmente tóxicos no ambiente. Diante disso, verificou-se que neste experimento os teores de metais no solo não extrapolaram os limites máximos permitidos para solos segundo a legislação vigente o que indica que o lodo em estudo apresenta baixa possibilidade de impactar o solo por metais potencialmente tóxicos.

Por não existir valores de referência para essas espécies metálicas nos solos do estado do Maranhão, foram utilizados os valores de referência para o estado de São Paulo conforme a norma técnica p 4230 da Cetesb [26], a qual define um ambiente seguro ou não de contaminantes inorgânicos de acordo com a concentração de metais potencialmente tóxicos encontrados.

A incorporação do lodo de ETA no solo contribuiu para aumentar os teores de cobre, chumbo, cromo e ferro. Embora estes metais apresentem riscos ambientais, notou-se que, mesmo ao adicionar o lodo, as concentrações de chumbo e cobre estiveram abaixo do teor considerado seguro para solos segundo a Cetesb [26] (17 e 35 mg kg⁻¹ respectivamente). O cromo na testemunha e no tratamento D1 esteve abaixo do valor considerado seguro (40 mg kg⁻¹), entretanto, com aplicações de doses crescentes, tratamentos D2 e D3, os teores de cromo foram aumentados de modo que ficaram na faixa de prevenção (40-75 mg kg⁻¹). Segundo a Cetesb [26], teores de metais que estiverem acima da faixa de prevenção poderão causar alterações prejudiciais à qualidade dos solos.

Os teores de cromo, cobre e chumbo no solo, após aplicação do lodo, também estiveram abaixo dos valores que indicam a concentração máxima desses metais no solo conforme a resolução 420/2009 [27], a qual afirma que as concentrações limites definidas para esses metais em solos do Brasil são de 75, 60 e 72 mg kg⁻¹, respectivamente.

Sendo assim, o lodo da ETA de Imperatriz-MA pode ser disposto em solo, pois não representa riscos de causar contaminação por cobre, chumbo e cromo. No entanto, a sua disposição deve ser controlada e estudada a longo prazo, com repetidas aplicações e avaliações das características químicas e biológicas do solo, além da presença de parasitas, pois essas avaliações são necessárias para verificar os possíveis impactos que a aplicação desse resíduo possa gerar ao ambiente.

Os resultados dos teores de metais potencialmente tóxicos também foram submetidos à análise de regressão conforme dispostos nas Figuras 3 e 4. De acordo com a Figura 3, pode-se

verificar que a concentração de Cr, Cu e o Pb se ajustaram ao modelo de regressão quadrática, a qual obteve elevado coeficiente de determinação. Esse resultado sugere que o aumento na concentração desses metais é determinado pelo aumento nas doses de lodo aplicadas no solo, o que indica a necessidade de controlar a disposição desse resíduo.

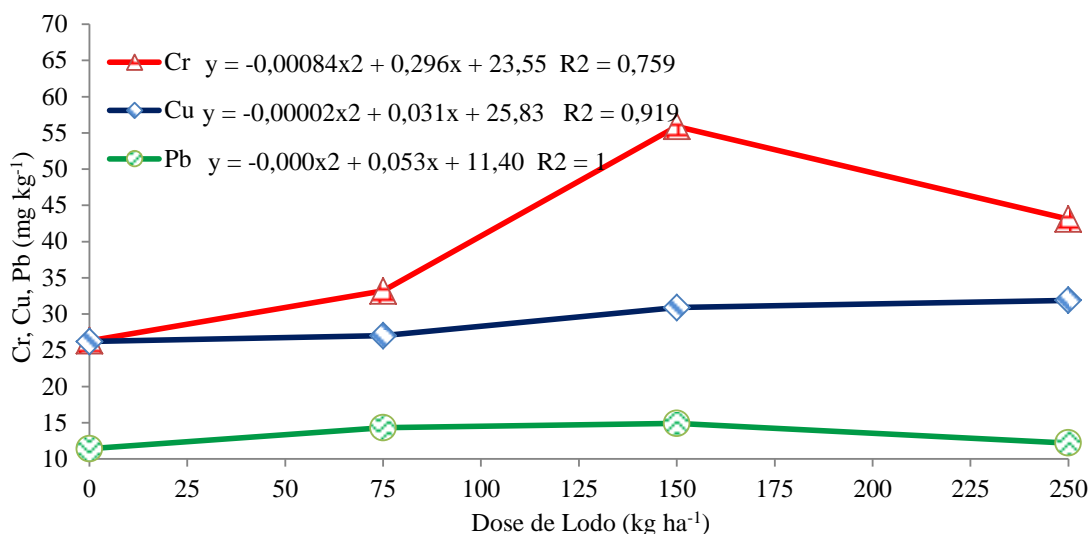


Figura 3: Efeito das doses crescentes de lodo sobre a concentração de Cr, Cu e Pb do solo.

Os teores de ferro, em função das doses de lodo, tiveram seus dados melhor ajustados ao modelo de regressão linear, chegando à conclusão de que o aumento de 1 kg lodo ha⁻¹ de solo proporcionou aumento de 36,45 mg de ferro no solo. O elevado coeficiente de determinação encontrado na Figura 4 indica que o aumento na concentração do ferro no solo está intimamente relacionado com as doses de lodo aplicadas.

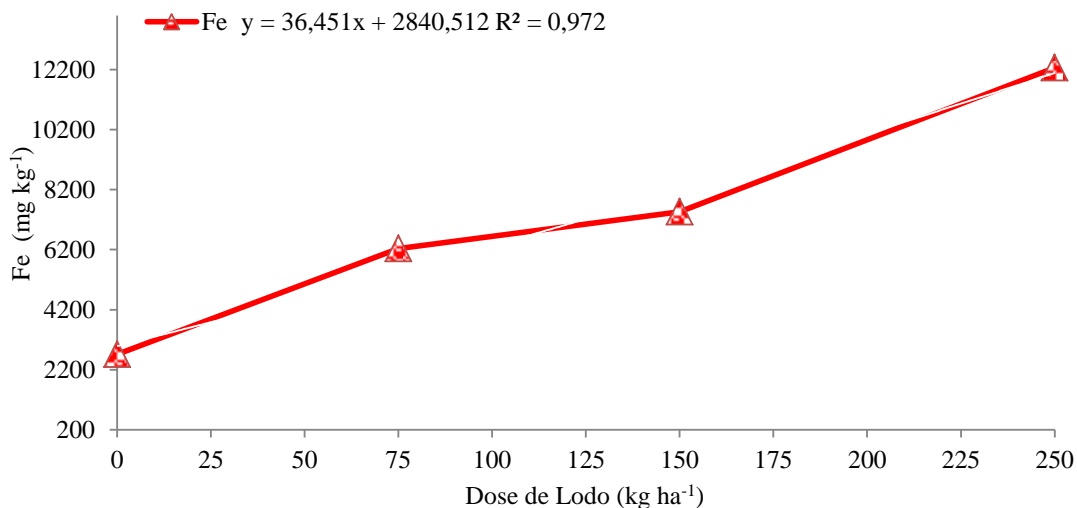


Figura 4: Efeito das doses crescentes de lodo sobre a concentração de Fe do solo.

4. CONCLUSÃO

O lodo de estação de tratamento de água pode ser utilizado como fertilizante agrícola, pois o mesmo não representa risco de contaminar o ambiente por metais potencialmente tóxicos.

A aplicação do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Imperatriz-MA proporcionou alterações significativas no pH, CTC e matéria orgânica do solo. Essas alterações contribuíram para aumentar a qualidade agrônômica do solo.

Nas condições estudadas, as concentrações dos metais potencialmente tóxicos (cobre, chumbo e cromo) não extrapolaram os limites toleráveis destes em solo, conforme critérios estabelecidos pela CETESB e pelo CONAMA.

A aplicação do lodo da estação de tratamento de água demanda precauções e cuidado. Pois os metais potencialmente tóxicos contidos no lodo, representam riscos para o ambiente e para a saúde humana. Dessa forma, a elaboração de um plano de reciclagem representaria um instrumento para a disposição ambientalmente adequada desse tipo de resíduo.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPEMA (Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento científico e Tecnológico do Maranhão) pela concessão da bolsa de iniciação científica ao primeiro autor. À CAEMA (Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão) por conceder as amostras de lodo. Ao CDT (Centro de Difusão Tecnológica) e a INFRAERO pelo espaço cedido.

1. Botero, G.W.; Santos, A. dos.; Oliveira, L.C. de.; Rocha, J.C. Caracterização de Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água: Perspectivas de Aplicação Agrícola. Química Nova, v. 32 n.1 p. 2018-2022, 2009.
2. Teixeira, S.T.; Melo, W.J. de.; Silva, E.T. da. Aplicação de Lodo da Estação de Tratamento de Água em Solo Degradado. Revista Pesquisa Agropecuária, v.40 n.1 p.91-94, 2005.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, 2004. Norma Brasileira de Regulamentação Técnica 10004-2004, Resíduos Sólidos. São Paulo, SP, Brasil. 71 p.
4. Sotero-Santos, R.B.; Rocha, O.; Povinelli, J. Evaluation of water treatment sludges toxicity using the *Daphnia bioassay*. Water Research, v. 39. p. 3909-3917, 2005.
5. Líbano, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Átomo, 2005. 444 p.
6. Altafin, L. Ácidos orgânicos e solubilização de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. 2005. Ano de Obtenção: 2005. 55p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
7. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Editor técnico: Fábio Cesar da Silva, 2º ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação tecnológica, 2009. 627 p.
8. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento-MAPA. Instrução Normativa n. 28, de 27 de julho de 2007. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 de julho de 2007. Seção 1, p.11
9. USEPA. Acid digestion of sediments, sludges, and soils, v. 2 p. 1-12. 1996. Disponível em <<http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf>> Acesso em 20 de fevereiro de 2013.
10. Silva, F. de A.S.; Azevedo, C.A.V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.4, n.1, p.71-78, 2002.
11. Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G.; Alvarez, V.H. Recomendações Para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais- 5ª Aproximação. 5. ed. Viçosa-MG. Editora UFV. 1999. 359 p.
12. Brady, N.C.; Weil, R. R. The nature and Properties of Soils.13ª ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall.2002. 960 p.
13. Nascimento, C.W.A.; Barros, D.A.S.; Melo, E.E.; Oliveira, A.B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28 n.2 p. 385-392, 2004.
14. Bettiol, W.; Fernandes, S.A.P. Efeito do lodo de esgoto na comunidade microbiana e atributo químicos do solo Jaguariúna. SP, Embrapa, (Comunicado Técnico,24) 2004.
15. Simonete, M.A.; Kiehi, J.C.; Andrade, C.A.; Teixeira, C.F.A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira. v.38, n. 3, p. 261-269, 2003.
16. Bezerra, F.B.; Oliveira, M.A.C.L. de.; Perez, V.D.; Andrade, A.G. de.; Meneguelli, N. do A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 3, p. 469-476, 2006.
17. Gomes, S.B.V.; Nascimento, C.W.A. do.; Biondi, C.M.; Accioly, A.M. de A. Alterações químicas em argilossolo tratado com lodo de esgoto. Revista Caatinga, v.3 n.1 p.185-194, 2005.

18. Corrêa, R.S.; Silva, L.C.R.; Baptista, G.M.M.; Santos, P.F. Fertilidade Química de um Substrato Tratado com Lodo de Esgoto e Composto de Resíduos domésticos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.14 n.5 p.538-544, 2009.
19. Barreira, L.P.; Philippi Júnior, A.; Rodrigues, M. S. Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: Qualidade dos compostos e processos de produção. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.11, n.4, p.385-393, 2006.
20. Lopes, A.S.; Guilherme, L.R.G. Fertilidade do solo e Produtividade Agrícola. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Ed). *Fertilidade do Solo*. Editora: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. Viçosa-MG, Editora: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p.1-64.
21. Abreu Junior, C. H.; Muraoka, T.; Oliveira, F.C. Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação por bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano. *Scientia Agrícola*, v.58, p.813-824, 2001.
22. Oliveira, F.C. Disposição de lodo de lodo de Esgoto e Composto de Lixo Urbano em latossolo Vermelho-amarelo Cultivado com cana-de-açúcar. 2000. Ano de Obtenção: 2000. 247 p. Tese (Doutorado em solos e Nutrição Mineral de Plantas) – Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
23. Tsutiya, M.T.; Hirata, A.Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água no Estado de São Paulo. In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, 2001.
24. Conselho Nacional de Meio Ambiente/CONAMA. 2006. Resolução 375/29 de Agosto de 2006. Resolução do Conama que dispõe sobre a Regulamentação do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto. Brasília. 2006
25. Bell, P.F.; James, B.R.; Chaney, R.L. Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt-amended soils. *Journal of Environmental Quality*, v.20, p.481- 486, 1991.
26. Companhia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo-CETESB. Norma Técnica p. 4230. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas. 32 p. 1999.
27. Conselho Nacional de Meio Ambiente/CONAMA. 2009. Resolução 420/28 de Dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópica. Brasília. 2009.