



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA FLORESTAL**  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais

**NUTRIENTES E METAIS PESADOS EM UM LATOSSOLO  
VERMELHO EM FUNÇÃO DE DOSES DE LODO DE  
ESGOTO**

**GREYCE CHARLLYNE BENEDET MAAS**

**CUIABÁ - MT**

**2011**

**GREYCE CHARLLYNE BENEDET MAAS**

**NUTRIENTES E METAIS PESADOS EM UM LATOSSOLO  
VERMELHO EM FUNÇÃO DE DOSES DE LODO DE  
ESGOTO**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Walcylene L. M. Pereira Scaramuzza**

**Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Oscarlina L. dos Santos Weber**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, para obtenção do título de mestre.

**CUIABÁ-MT**

**2011**

M111n

Maas, Greyce Charllyne Benedet.

Nutrientes e Metais Pesados em um Latossolo Vermelho  
em Função de Doses de Lodo de Esgoto./ Greyce Charllyne

Benedet Maas. Cuiabá: UFMT, 2011.

61 fls.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA FLORESTAL**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**Título:** Nutrientes e metais pesados em um LATOSSOLO VERMELHO  
em função de doses de lodo de esgoto

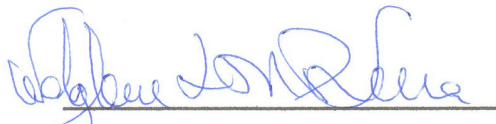
**Autor:** Greyce Charlyne Benedet Maas

**Orientadora:** Dr<sup>a</sup>. Walcyline Lacerda Matos Pereira Scaramuzza

**Co-orientadora:** Dr<sup>a</sup>. Oscarlina Lúcia dos Santos Weber

**Aprovada em 11 de Março de 2011.**

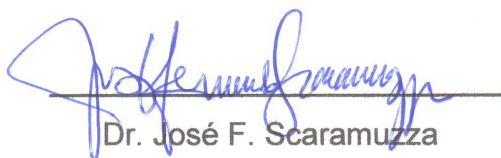
**Comissão Examinadora:**



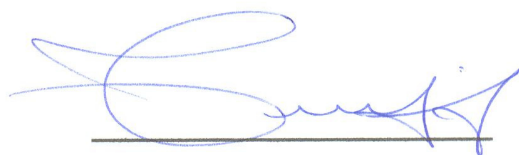
Dr<sup>a</sup>. Walcyline L. M. P. Scaramuzza  
Orientadora – FAMEV/UFMT (Cuiabá)



Dr<sup>a</sup>. Oscarlina L. dos S. Weber  
PPGCFA/UFMT (Cuiabá)



Dr. José F. Scaramuzza  
FAMEV/UFMT (Cuiabá)



Dr. Cassiano Cremon  
UNEMAT (Cáceres)

*Dedico a meus pais, Janete e Adão, à minha irmã Kelly e ao meu irmão Patrick, e, em especial, à minha avó Lúcia e à minha tia Albertina, que contribuíram de forma decisiva para minha educação e formação do meu caráter.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por iluminar a minha vida colocando em meu caminho pessoas tão especiais;

Ao meu esposo Carlos Roberto Sanquetta, pela presença, ajuda, carinho e conforto emocional dedicados;

À minha orientadora Walcyline L. M. P. Scaramuzza e à minha co-orientadora Oscarlina L. dos Santos Weber, pelo apoio, confiança e orientação;

Ao professor José Fernando Scaramuzza, pela valiosa contribuição;

À Professora Doutora Rejane Nascentes, pela ajuda;

Às amigas Lorena de Souza Tavares, Érica Vitória Almeida, Flávia Daniela Pereira Ramos, pela generosidade e carinho;

Aos funcionários e estagiários dos Laboratórios de Solos e de Nutrição Mineral de Plantas, pela ajuda nas análises laboratoriais;

Aos funcionários do Laboratório de Análise de Metais Pesados do Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas e da Terra, pela ajuda nas análises;

Aos colegas de mestrado, pela convivência e experiências compartilhadas;

À Fapemat, pela bolsa de mestrado e auxílio à pesquisa;

À Companhia de Saneamento da Capital, Sanecap, pela contribuição na execução do experimento;

Ao Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT Cuiabá, pela contribuição na realização do experimento;

A todos que fizeram parte da minha vida e que de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LODO DE ESGOTO .....	2
2.2 DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESGOTO NO SOLO .....	3
2.3 LEGISLAÇÃO DO USO DO LODO DE ESGOTO NO SOLO .....	5
2.4 IMPACTOS DO USO DO LODO DE ESGOTO NO SOLO .....	6
2.5 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM AS APLICAÇÕES DE LODO .....	8
2.6 RETENÇÃO DOS ELEMENTOS NO SOLO .....	10
2.7 NUTRIENTES E METAIS PESADOS EM SOLOS EM FUNÇÃO DE DOSES DE LODO DE ESGOTO .....	13
2.8 LIXIVIAÇÃO DE NUTRIENTES E DE METAIS PESADOS NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE LODO NO SOLO.....	14
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	16
3.2 AMOSTRAGEM DO SOLO.....	16
3.2.1 Atributos Químicos do Solo .....	17
3.3 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO .....	18
3.4 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO .....	19
3.5 ANÁLISES QUÍMICAS.....	20
3.5.1 Análises da Água Percolada .....	20
3.5.2 Análises do Solo.....	21
3.6 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	21
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	21
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>22</b>
4.1 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM FUNÇÃO DE DOSES DE LODO .....	22
4.1.1 Matéria Orgânica.....	22
4.1.2 pH.....	23
4.1.3 Cálcio e Magnésio.....	24
4.1.4 Alumínio .....	25
4.1.5 Soma de Bases .....	26
4.1.6 CTC Total .....	27
4.1.7 CTC Efetiva .....	28
4.1.8 Saturação por Bases.....	29
4.1.9 Condutividade Elétrica .....	30
4.2 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E DE METAIS PESADOS EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO .....	31
4.2.1 Nitrogênio.....	31
4.2.2 Fósforo .....	32

4.2.3 Potássio .....	33
4.2.4 Sódio .....	33
4.2.5 Ferro.....	33
4.2.6 Manganês.....	34
4.2.7 Cobre .....	35
4.2.8 Zinco .....	36
4.2.9 Cádmio, Níquel, Chumbo e Cromo .....	38
4.2.10 Sequência da Concentração Média de Metais Pesados no Solo .....	38
<b>4.3 AVALIAÇÃO DA ÁGUA PERCOLADA E DA LIXIVIAÇÃO DE ÍONS NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO APLICADAS NO SOLO .....</b>	<b>39</b>
4.3.1 pH da Água Percolada .....	39
4.3.2 Condutividade Elétrica .....	40
4.3.3 Potássio .....	40
4.3.4 Sódio .....	41
4.3.5 Fosfato .....	42
4.3.6 Nitrato.....	43
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>



## RESUMO

MAAS, Greyce Charllyne Benedet. **Nutrientes e metais pesados em um LATOSSOLO VERMELHO em função de doses de lodo de esgoto.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT. Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Walcylene Lacerda Matos Pereira Scaramuzza.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do uso de doses crescentes de lodo de esgoto na concentração de nutrientes e de metais pesados em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em colunas de lixiviação, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Na coluna, os tratamentos foram quatro doses de lodo, e na água percolada, os tratamentos foram distribuídos em parcelas subdivididas no tempo, sendo quatro doses de lodo e quatro períodos de coleta (aplicações de chuva simulada). As doses utilizadas foram equivalentes a 0 (testemunha); 2,5; 5 e 7,5 t ha<sup>-1</sup> de lodo seco. As características avaliadas na coluna foram pH, Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup>, H + Al, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, P, CTC, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Ni, Cr e Pb, nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT) e condutividade elétrica. As características avaliadas na água percolada foram pH, condutividade elétrica, sódio, potássio, fosfato e nitrato. O uso de doses crescentes de lodo de esgoto diminuiu o pH, aumentou a condutividade elétrica, a matéria orgânica e os teores de manganês e cobre disponíveis no solo. Não houve alterações nos teores de potássio, fósforo, nitrogênio total, ferro e zinco no solo. Na água percolada, o teor de nitrato aumentou com o incremento das doses e com as aplicações de chuva simulada. As concentrações de nutrientes no solo estiveram dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente, e o nitrato na água percolada esteve acima dos limites estabelecidos. Os metais pesados não representaram risco de contaminação do solo pela sua baixa concentração no lodo utilizado.

**Palavras-chave:** lixiviação, nitrato, contaminação.

## ABSTRACT

MAAS, Greyce Charlyne Benedet. **Nutrient and heavy metal in an Oxisol amended with increasing levels of sewage sludge.** 2011. Dissertation (MSc in Forestry and Environmental Sciences) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT. Advisor: Prof. Dr. Walcylene Lacerda Matos Pereira Scaramuzza.

The objective of this study was to evaluate the influence of increasing sewage sludge levels on the concentration of nutrients and heavy metals in an Oxisol. The experiment was established in a greenhouse using columns of lixiviation, by means of a completely randomized experimental design with four repetitions. In the column, the treatments were four sludge dosages, in the percolated water the treatments were distributed in a split-plot design with four sludge dosages and four time series representing rainfall (simulated). The sludge dosages were as follows: 0 (control); 2.5; 5.0 and 7.5 t ha<sup>-1</sup> (dry weight). The characteristics evaluated in the column were pH, Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>, Al<sup>+3</sup>, H + Al, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, P, CEC, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Ni, Cr e Pb, total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC) and electrical conductivity. The characteristics evaluated in percolated water were pH, electrical conductivity, sodium, potassium, phosphate and nitrate. Increased sludge level diminished pH, increased electric conductivity, organic matter as well as manganese and copper available in the soil. Manganese was the only element to increase in all soil layers analyzed. No change in potassium, phosphorus, total nitrogen, iron, and zinc were noticed. Nitrate content increased with increasing sludge level and simulated rain fall. Nutrient concentrations were within the limits established by the current legislation, but nitrate in percolated water was beyond such limits. Heavy metals did not represent risk of soil contamination due to the low concentration of sludge used in the study.

**Keywords:** lixiviation, nitrate, contamination

# 1 INTRODUÇÃO

Entre os resíduos originados no setor de saneamento, destaque é dado ao lodo de esgoto, pois esse resíduo é produzido em grandes quantidades e vem sendo utilizado para recuperar solos degradados, disponibilizando os nutrientes necessários para o desenvolvimento de culturas agrícolas e florestais. Apesar dos benefícios do uso do lodo como fertilizante, alguns elementos presentes nesse resíduo, entre eles, os metais pesados, podem causar contaminação do solo e, conseqüentemente, do lençol freático.

No Brasil, o uso agrícola do lodo de esgoto ainda não foi amplamente difundido, contudo, o resíduo vem sendo utilizado em culturas como milho, cana-de-açúcar e eucalipto. Considerando que grande parte do território brasileiro é composto por LATOSSOLO, esse tipo de solo é de especial interesse para estudos que ampliem o uso sustentável do lodo no país.

Para que o uso do lodo na fertilização agrícola se torne realmente uma prática sustentável, é necessário o estudo de doses de aplicação que alterem a concentração de nutrientes e metais pesados no solo até limites considerados aceitáveis pela legislação vigente. Entretanto, em muitos casos, as doses utilizadas são baseadas na necessidade da cultura, o que pode exceder o limite para garantir o uso ambientalmente seguro desse resíduo. Além disso, a aplicação do lodo em uma área também depende da capacidade desse solo em reter os elementos potencialmente contaminantes, impedindo que migrem para as águas subterrâneas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do uso de doses crescentes de lodo de esgoto na concentração de nutrientes e metais pesados em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LODO DE ESGOTO

Segundo Aisse et al. (1999), lodo, mistura de matéria orgânica e inorgânica, é uma denominação genérica para os sólidos que se acumulam no sistema de tratamento de esgoto, que devem, periódica ou continuamente, de acordo com o sistema de tratamento, ser descartados.

Nos processos biológicos de tratamento, parte da matéria orgânica é adsorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário, composto principalmente de sólidos biológicos, e por isso também chamado de biossólido. Para que esse termo seja adotado, é necessário ainda que suas características químicas e biológicas sejam compatíveis com o emprego produtivo (SPERLING e ANDREOLI, 2001).

Quanto às características físicas do lodo, Ferreira e Andreoli (1999a) citaram que o resíduo geralmente se encontra em forma líquida ou líquido semissólido, contendo normalmente entre 0,25 a 12 % de sólidos. Para Sperling e Gonçalves (2001), a umidade influi nas propriedades mecânicas do lodo, as quais influenciam no tipo de manuseio e disposição final. Um lodo com um teor de sólidos secos de 2,0 % possui umidade de 98 %, o que significa que, em cada 100 kg de lodo, 98 kg são de água e 2 kg de sólidos.

O pH do lodo situa-se próximo à neutralidade (entre 6,0 a 7,0); o teor de carbono orgânico é de aproximadamente 30 %; e os teores de nitrogênio, fósforo e enxofre são relativamente altos. Os teores de sódio podem ser altos e o lodo pode ter altas concentrações de micronutrientes e de metais pesados (MEURER, 2006).

Oliveira (2000) conduziu uma pesquisa sobre a composição do lodo de esgoto por meio de revisão bibliográfica em literatura nacional, tendo chegado aos seguintes resultados: matéria orgânica =

313 a 722 g kg<sup>-1</sup>; carbono orgânico = 133 a 229 g kg<sup>-1</sup>; nitrogênio total = 7,2 a 30,7 g kg<sup>-1</sup>; fósforo total = 0,5 a 21,0 g kg<sup>-1</sup>; potássio = 0,8 a 14,6 g kg<sup>-1</sup>; cálcio = 13,5 a 162,7 g kg<sup>-1</sup>; magnésio = 2,1 a 27,3 g kg<sup>-1</sup>; e enxofre total = 7,2 a 19,2 g kg<sup>-1</sup>.

Tsutiya (2001a) destacou que as características de um lodo de esgoto dependem de fatores como tipo do esgoto, processo e grau de tratamento desse esgoto, tipo de lodo, que pode ser primário, secundário ou terciário, e do processo de tratamento do lodo.

Os processos de estabilização foram desenvolvidos com o objetivo de estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica presente no lodo, reduzindo o risco de putrefação e no caso do Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RALF) ou *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), a estabilização é obtida pela digestão anaeróbia do lodo dentro do próprio reator. Portanto, ao fazer a descarga periódica de lodo, ele passa para o processo de desidratação estabilizado (LUDOVICE, 2001).

A composição do lodo RALF pode ter grandes variações, pois esses reatores são descarregados por bateladas em média a cada quatro a cinco meses. O lodo descartado é mais mineralizado, com menor conteúdo de matéria orgânica e nutrientes, e sua umidade também é variável (COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ - SANEPAR, 1997).

## 2.2 DISPOSIÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO SOLO

Algumas formas de uso do lodo de esgoto com disposição no solo citadas por Tsutiya (2001b) são: uso agrícola com aplicação direta, fertilizante e substrato; aplicação em plantações florestais; deposição em aterro sanitário; recuperação de solos em áreas degradadas e recuperação de áreas de mineração.

Com relação a seu efeito no solo, a parte orgânica do lodo pode aumentar o conteúdo de húmus, que melhora a capacidade de

armazenamento e de infiltração da água, aumenta a resistência dos agregados, reduzindo a erosão (SANEPAR, 1997).

Andreoli et al. (2001) ressaltaram que os efeitos da matéria orgânica no solo se fazem sentir a longo prazo, melhorando a resistência do solo à erosão e ao adensamento e ativando a vida microbiana.

Para Bettioli e Camargo (2006), o aproveitamento do lodo de esgoto em solos agrícolas tem como benefícios a incorporação dos macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e dos micronutrientes (zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio).

As áreas florestadas com espécies de eucaliptos e pinheiros, utilizadas para a produção de celulose e madeira para serraria, também podem ser beneficiadas com o uso do lodo. Para o lodo produzido nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) da região metropolitana de São Paulo, o Plano Diretor da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) selecionou as plantações florestais como principal cultura para receber os biossólidos (TSUTIYA, 2001b).

As áreas de reflorestamento têm especial interesse, podendo receber grandes quantidades de lodo, pois os produtos dessa atividade não representam risco para o consumo (ANDREOLI et al., 2001). Em diversos países, o lodo também é utilizado em pastagens tanto para criação extensiva como para silagem (SANEPAR, 1997).

Outro uso para o lodo é o *landfarming* (técnica em que o resíduo é incorporado ao solo para promover a degradação ou imobilização de componentes perigosos). Nesse sistema de tratamento no solo, não é feito uso dos nutrientes e da matéria orgânica do lodo para fins produtivos. O objetivo é a biodegradação do lodo pelos microrganismos e a retenção de metais na camada superficial do solo. Como a área dedicada ao *landfarming* não tem finalidade agrícola, as taxas de aplicação são bem maiores (ANDREOLI et al., 2001).

Com relação ao uso na recuperação de áreas degradadas, normalmente áreas de fácil localização, com o avanço das legislações ambientais, elas tendem a se revelar um mercado potencial para a

disposição do lodo (ANDREOLI et al., 2001). Na recuperação de áreas degradadas, deve ser dada atenção às condições topográficas e à possibilidade de mecanização, já que o lodo normalmente será disposto em solo descoberto e sujeito à erosão (SANEPAR, 1997).

## 2.3 LEGISLAÇÃO DO USO DO LODO DE ESGOTO NO SOLO

Até recentemente, o Brasil não dispunha de uma regulamentação oficial quanto aos níveis máximos de substâncias químicas no solo, sendo necessário utilizar índices como o americano, proposto pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA). Alguns autores também utilizavam, como níveis para referência de comparação, os valores orientadores de metais pesados no solo da Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo – Cetesb (2005). Contudo, em dezembro de 2009, foi publicada a Resolução CONAMA nº 420 que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas.

A Resolução estabelece que os Valores de Referência de Qualidade (VRQs) do solo para substâncias químicas naturalmente presentes sejam estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes dos Estados e do Distrito Federal, em até quatro anos após a publicação da Resolução. O VRQ, como definido na própria Resolução, é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo, sendo determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos.

O Estado do Mato Grosso ainda não possui os VRQs. Já o Valor de Prevenção (VP) é a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais; e o Valor de Investigação (VI) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Para as águas subterrâneas existe ainda a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004), que visa a assegurar a qualidade da água a ser consumida após tratamento prévio e estabelece os padrões de potabilidade para substâncias químicas que representam riscos para saúde.

A Resolução CONAMA nº 375 de 2006 estabelece critérios e procedimentos para o uso, em áreas agrícolas, de lodo de esgoto gerado em estação de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, visando a benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente. A Resolução estabelece, entre outros fatores, a frequência de monitoramento do lodo de esgoto de acordo com a dosagem utilizada; requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto destinado à agricultura e cargas acumuladas teóricas permitidas de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado em solos agrícolas.

## 2.4 IMPACTOS DO USO DO LODO DE ESGOTO NO SOLO

A aplicação do lodo de esgoto no solo é uma prática secular, porém, pouco se conhecia sobre os impactos adversos que os metais pesados, produtos orgânicos tóxicos, nutrientes e organismos patogênicos, ocasionalmente presentes no lodo de esgotos, poderiam causar ao solo e à população (PINTO, 1998).

Os principais riscos associados à utilização agrícola do lodo referem-se à questão dos metais pesados, aspectos sanitários, micropoluentes orgânicos e nitrogênio. Tanto os metais quanto os agentes patogênicos tendem a se coprecipitar com o esgoto e se concentrar no lodo (FERREIRA e ANDREOLI, 1999b).

O lodo de esgoto, além de metais pesados, pode conter matéria orgânica e nutrientes essenciais para as plantas, tais como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), em formas metálicas livres e de óxidos, hidróxidos, carbonatos, sulfetos e complexos orgânicos. Esses compostos sofrem



reações químicas e biológicas no solo, que alteram sua solubilidade e mobilidade e, conseqüentemente, sua disponibilidade e toxicidade para as plantas. Desse modo, o uso agrícola desses resíduos, como fonte de nutrientes para as plantas, seria determinado pela relação entre os benefícios do fornecimento de nutrientes e a contaminação decorrente de seu uso (MIYAZAWA et al., 1999).

O fósforo e o nitrogênio, dependendo de suas concentrações, podem se destacar como contaminantes ou poluentes de águas superficiais e subterrâneas (COSTA et al., 2010).

A concentração de metais pesados do lodo é um dos controles fundamentais para seu uso seguro. Alguns são micronutrientes necessários às plantas, como cobre (Cu) e zinco (Zn). Outros, além de não serem necessários, podem se acumular no solo em níveis tóxicos às plantas e ao homem (SANEPAR, 1997).

O risco associado aos metais pesados do lodo está principalmente ligado ao fato de o solo ser capaz de estocar esses metais. Embora os metais pesados sejam cumulativos no solo, diversos fatores do solo interferem na dinâmica de sua disponibilidade, como o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), a textura e o teor de matéria orgânica. Dessa forma, dependendo das condições ambientais, os metais podem estar presentes no solo em formas não disponíveis para as plantas (SANEPAR, 1997).

Os metais pesados não apenas exercem efeitos negativos sobre o crescimento das plantas, mas também afetam os processos bioquímicos que ocorrem no solo. A decomposição do material orgânico adicionado ao solo, a mineralização do nitrogênio e a nitrificação podem ser inibidos em locais contaminados por metais pesados (TSUTIYA, 2001a).

No solo, reações de adsorção, complexação, oxidação-redução e precipitação controlam a disponibilidade e solubilidade dos metais. Desse modo, o estudo do aproveitamento agrícola de resíduos urbanos contendo altos teores de metais pesados se reveste de grande

importância, na medida em que se busca reduzir resíduos poluentes sem, contudo, poluir o ecossistema (DIONÍSIO et al., 1999).

Um aspecto importante do uso agrícola do lodo de esgoto, ainda pouco investigado em solos tropicais, refere-se à possibilidade de contaminação do lençol freático e cursos de água com nitrato resultante da mineralização do nitrogênio orgânico do lodo. Os trabalhos de pesquisa existentes sobre o assunto indicam que quantidades expressivas de nitrato podem se deslocar para camadas subjacentes à zona de exploração das raízes de culturas anuais, configurando um quadro de risco de contaminação ambiental com esse ânion (DYNIA e BOEIRA, 2000).

## 2.5 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO COM A APLICAÇÃO DE LODO

Segundo Vaz e Gonçalves (2002), a utilização do biossólido pode resultar em alterações nas propriedades químicas do solo, influenciando, de maneira positiva, na fertilidade. De acordo com os autores, vários pesquisadores relataram aumento de pH, matéria orgânica, CTC e teor de macronutrientes, principalmente N, P e Ca, em solos que receberam lodo.

Visando a estudar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas, Galdos et al. (2004) conduziram experimento para identificar alterações em propriedades químicas do solo em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, de textura argilosa. O experimento consistiu na aplicação de lodo de esgoto em duas doses (10,8 e 21,6 t ha<sup>-1</sup>) comparadas a uma testemunha com adubação química. Os autores observaram diminuição do pH do solo em relação à testemunha e também diminuição do pH em direção às camadas mais profundas (até 0,20 m).

Samaras et al. (2008) estudaram os efeitos da aplicação de lodo de esgoto nas propriedades químicas do solo na Grécia central utilizando doses de 10,30 e 50 t ha<sup>-1</sup>. Os autores observaram decréscimo

no pH e aumento da matéria orgânica no solo em função da aplicação das doses de lodo.

Silva et al. (2001) observaram aumento nos teores de Ca do solo utilizando doses de 0, 20 e 40 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto em um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, cultivado com cana-de-açúcar, além de aumento na saturação por bases, fato também observado por Chueri et al. (2007).

Chueri et al. (2007), para avaliar o lodo de esgoto como complemento da adubação mineral, instalaram experimento combinando adubação mineral com 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto e observaram, além do aumento na saturação por bases e capacidade de troca de cátions, diminuição da acidez potencial.

Em estudo realizado por Trannin et al. (2008), com doses crescentes de biossólido (0, 6, 12, 18 e 24 t ha<sup>-1</sup> base seca) sobre atributos químicos e físicos de um CAMBISSOLO Distrófico, os autores observaram aumento do alumínio trocável, da soma de bases e da CTC efetiva do solo estudado. Os autores também observaram maiores teores de carbono orgânico, porcentagem de saturação por bases e menor pH que o solo sem adubação.

Messias et al. (2007) montaram colunas preenchidas com amostras de solo misturadas com doses correspondentes a 0, 25, 50 e 75 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto. Os autores observaram diminuição do pH do solo em função das doses, tendo ocorrido efeito contrário com a condutividade elétrica.

Hussein (2009), estudando efeito do lodo de esgoto em solos arenosos na Arábia Saudita, nas doses 25, 50, 75, 100 e 125 t ha<sup>-1</sup>, observou diminuição do pH do solo e aumento da condutividade elétrica.

## 2.6 RETENÇÃO DE ELEMENTOS NO SOLO

Segundo Doménech (1998), certos componentes do solo têm papel depurador, retendo os contaminantes pelos fenômenos de adsorção física ou de interação química. Nesse sentido, merece destaque a função que exercem as substâncias húmicas do solo, capazes de fixar uma variedade de substâncias, em particular cátions polivalentes como os metais pesados. Mas o solo possui uma capacidade limitada de autodepuração.

De acordo com Gatiboni (2010), a adsorção química ocorre quando há ligação iônica ou covalente entre o coloide e o íon, sendo dificultada sua passagem da fase sólida para a líquida. Há três tipos de adsorção química que são a complexação, a quelação e a precipitação, ocorrendo a adsorção física quando há ligação físico-química de baixa energia entre o íon e o coloide. São forças de pequena magnitude que permitem a troca rápida de íons entre a fase sólida e a solução do solo, compondo a parte mais ativa da CTC e a da CTA.

A solução do solo pode ser definida como a fase aquosa associada com a fase sólida do solo que ocupa o seu espaço poroso. O estudo e a caracterização da composição da solução do solo podem ser utilizados para prever transformações e reações de sorção, dissolução e precipitação que podem ocorrer nos solos. A análise química da solução do solo permite identificar as formas e as quantidades de elementos químicos que estão sendo adicionados ao solo e, também, a quantidade deles que está sendo transferida para outros compartimentos do ambiente, através do lençol freático (MEURER, 2006).

Os íons da solução do solo podem ser adsorvidos por componentes orgânicos ou inorgânicos do solo e os íons adsorvidos podem ser dessorvidos (liberados) para a solução do solo. Se a solução do solo se encontra supersaturada com algum elemento, ele pode se precipitar na forma de um mineral até o equilíbrio ser restabelecido; se a solução do solo fica abaixo da concentração de equilíbrio em relação a

algum mineral, ele pode se dissolver da fase sólida até o equilíbrio ser restabelecido (MEURER, 2006).

Os íons da solução do solo podem ser lixiviados através do perfil do solo para o lençol freático ou carregados pelas águas superficiais que escorrem sobre o terreno, ou ainda, pela evapotranspiração e pelo dessecação do solo, transportado para as camadas superficiais do solo; fertilizantes são frequentemente adicionados ao solo e sua dissolução pode levar à formação de novos produtos e reações. Os microrganismos também podem remover íons da solução do solo e quando eles morrem e a matéria orgânica é decomposta, os íons são novamente liberados para a solução do solo. Gases podem ser liberados para a atmosfera do solo ou podem estar dissolvidos na solução do solo (MEURER, 2006).

Por troca iônica do solo, são entendidos os processos reversíveis, ou temporariamente irreversíveis, pelos quais as partículas sólidas do solo, como minerais e matéria orgânica, adsorvem os íons da fase aquosa, ao mesmo tempo desadsorvem quantidades equivalentes de outros íons de mesma carga, estabelecendo o equilíbrio entre as fases (LUCHESE et al., 2002).

Esse fenômeno das trocas iônicas depende de dois fatores básicos do solo: existência de cargas elétricas positivas e negativas nas micelas coloidais do solo e tipos de cátions e ânions na solução do solo, além de suas concentrações (LUCHESE et al., 2002).

Segundo Motta et al. (2007), os nutrientes aplicados ao solo podem reagir de diferentes maneiras com os componentes sólidos, líquidos e gasosos, sendo mais comum: (a) ficarem dissolvidos na solução do solo nas formas livres ou ligados a outros elementos ou compostos orgânicos de baixo peso molecular; (b) serem adsorvidos fracamente pelas cargas existentes nos compostos minerais ou orgânicos do solo (Capacidade de Troca Catiônica - CTC e Capacidade de Troca Aniônica - CTA); (c) reagirem fortemente na superfície das partículas do solo com reações de alto grau de energia; (d) reagirem com outros elementos no solo formando outros compostos; (e) sofrerem processo de

oxidação ou hidrólise formando óxidos ou hidróxidos; e (f) serem absorvidos, tornando-se parte dos tecidos vegetais ou microbianos, ou ainda dos demais organismos vivos do solo.

Os micronutrientes também podem reagir de diversas maneiras no solo, variando as formas como permanecem no solo, tanto das suas características químicas (valência, raio iônico, raio de hidratação) quanto das características do próprio solo (pH, potencial de oxirredução, mineralogia, textura e teor de matéria orgânica). Assim, pelos tipos de reações que acompanham a aplicação de um determinado micronutriente ao solo, podem ser definidos sua mobilidade, lixiviação, efeito residual, bem como sua disponibilidade para as plantas a curto e longo prazo (MOTTA et al., 2007).

Pode ocorrer acúmulo de elementos químicos na fase sólida do solo por diferentes caminhos, com diversos níveis energéticos, os quais estabelecem a maior ou menor reversibilidade de suas reações. Essas reações determinam a quantidade do elemento que estará disponível na solução do solo aos sistemas biológicos e compreendem, basicamente, as de precipitação, de dissolução, de adsorção e de oxirredução (CAMARGO et al., 2001).

Pela pouca presença de trabalhos básicos realizados no Brasil referentes ao uso do lodo de esgoto, há necessidade de se dar maior importância ao estudo da química dos elementos no solo. É preciso reunir informações científicas para entender melhor como esses elementos se comportam em diferentes situações. Parece imprescindível que isso seja feito levando em conta as propriedades de superfície de solos, a composição química, a mineralogia, a reação do solo e a cinética dos processos (RAIJ, 2001).

Nas últimas três décadas, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas com a finalidade de avaliar a biodisponibilidade de micronutrientes e estudar o possível potencial de contaminação e poluição do solo por metais pesados (CAMARGO et al., 2001).

## 2.7 NUTRIENTES E METAIS PESADOS EM SOLOS EM FUNÇÃO DE DOSES DE LODO DE ESGOTO

Tendo como objetivo avaliar a lixiviação do cádmio em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico e um NITOSSOLO, Prado e Juliatti (2003) instalaram experimento em colunas de PVC com aplicação de biossólido contaminado com cádmio. Os autores concluíram que o Cd esteve imóvel nos dois solos estudados.

A movimentação do ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e cádmio (Cd) em um solo fertilizado com lodo de esgoto foi estudada por Messias et al. (2007). Os autores montaram colunas preenchidas com amostras de solo misturadas com doses correspondentes a 0, 25, 50 e 75 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto e observaram aumento nos teores de Cu, Zn, Fe e Cd.

Com relação aos macronutrientes, Trannin et al. (2008), em CAMBISSOLO Distrófico, observaram maiores teores de carbono orgânico nos solos tratados com lodo de esgoto, enquanto Galdos et al. (2004), em LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, não observaram aumento nos teores de fósforo ao utilizar lodo de esgoto. Luchese (1998) e Melo (2001) não observaram aumento no teor de potássio. Samaras et al. (2008) observaram aumento nos teores de nitrogênio e fósforo, mas não observaram aumento nos teores de potássio.

Madalão et al. (2009), estudando um LATOSSOLO degradado, aplicaram cinco doses de esgoto doméstico (0, 25, 50, 75 e 100 t ha<sup>-1</sup>) por períodos de incubação de 0, 20, 40, 60 e 80 dias. Os autores não observaram diferenças nos teores de sódio no solo.

Com relação aos micronutrientes, Simonete e Kiehl (2002), em ARGISSOLO AMARELO Eutrófico tratado com doses equivalentes a 0, 10, 20, 30, 40 e 50 t ha<sup>-1</sup> de lodo, observaram diminuição no pH do solo com a aplicação do lodo e conseqüente aumento na disponibilidade de Mn. Messias et al. (2007) observaram aumento nos teores de Cu. Oliveira (1995), estudando o efeito de doses de lodo de esgoto (0, 50, 100 e 150 t ha<sup>-1</sup>) em NEOSSOLO Quartzarênico e NITOSSOLO,

observou aumento na disponibilidade de zinco somente para a maior dose aplicada. Messias et al. (2007) observaram que os metais Cu, Zn, Fe e Mn ficaram retidos em maior quantidade nas primeiras camadas do solo.

Simonete e Kiehl (2002), num experimento com o objetivo de avaliar o efeito do lodo em ARGISSOLO VERMELHO AMARELO Eutroférico com doses de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 t ha<sup>-1</sup>, observaram que os teores de Cd, Cr, Pb e Ni eventualmente extraídos do solo pelas soluções HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>, Mehlich<sup>-3</sup> e DTPA estiveram, para todos os tratamentos, abaixo do limite de determinação do método. O mesmo foi observado por Oliveira e Mattiazzo (2001), que analisaram os metais diretamente da solução do solo e também o teor total por espectrometria de absorção atômica. Pigozzo et al. (2004), utilizando extrator DTPA, também observaram que os metais estiveram abaixo do limite de detecção do método utilizado.

## 2.8 LIXIVIAÇÃO DE NUTRIENTES E DE METAIS PESADOS NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO NO SOLO

Andrade et al. (2005) realizaram experimento em colunas de lixiviação cujos tratamentos foram quatro tipos de água de irrigação - água de abastecimento, água com fertilizante, efluente de esgoto e efluente de esgoto modificado - em GLEISSOLO e ARGISSOLO cultivados com milho. Os autores constataram presença de nitrato e sódio no lixiviado do ARGISSOLO significativamente maiores que os do GLEISSOLO, o que limitou o ARGISSOLO para suporte à deposição de efluentes domésticos, especialmente em regiões com lençol freático mais próximo à superfície.

Paglia (2004) avaliou a lixiviação de espécies químicas em um solo tratado com lodo de esgoto em colunas de solo. A presença de lodo de esgoto aumentou a concentração de nitrato nas soluções na maioria das lixiviações. Todas as soluções coletadas tiveram valores de nitrato maiores que o valor máximo permitido pela legislação vigente



(10 mg L<sup>-1</sup>). Não foi detectada presença de fosfato em nenhuma das lixiviações.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá-MT.

#### 3.2 AMOSTRAGEM DO SOLO

O solo utilizado foi classificado pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo como LATOSSOLO VERMELHO Distroférico (EMBRAPA, 2009), moderado, textura argilosa, com 45 e 47 % de argila, respectivamente, nos horizontes Ap (0 a 0,15 m) e AB (0,15 a 0,40 m). O local é pertencente ao Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), campus Cuiabá, onde atualmente na área de coleta há uma plantação de manga, sendo que originalmente a área estava sob Cerrado.

Foram coletados dois tipos de amostra de solo: a) amostra deformada para caracterização química (pH,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{H} + \text{Al}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , P, CTC) e análise de Cu, Fe, Mn e Zn, nitrogênio total (NT), carbono orgânico total (COT) e condutividade elétrica; b) amostras indeformadas coletadas em colunas de lixiviação (tubos de PVC com 110 mm de diâmetro e 0,35 m de altura) para quantificar alguns elementos químicos contidos no lodo de esgoto que lixiviaram via água de chuva simulada, bem como ficaram retidos no solo.

Para as amostras indeformadas coletadas em coluna de lixiviação, utilizou-se tubo de PVC empregado para encanamento de água por ser mais resistente, evitando a possibilidade de quebra durante a coleta da amostra indeformada do solo. O tubo foi cortado formando 16 colunas de 0,35 m de altura cada, sendo que as colunas foram ranhuradas em seu interior com auxílio de lixa ferro no sentido contrário

ao escoamento da água para evitar ocorrência de caminho preferencial do lixiviado.

Primeiramente, a área escolhida para coleta foi limpa e em seguida foi aberta uma trincheira de 0,30x0,30x0,30 m. Ao lado da trincheira, os tubos foram cravados no solo um a um, cuidadosamente, com auxílio de gabarito de madeira e marreta, até a profundidade de 0,30 m. Posteriormente, com o auxílio de uma pá, o solo em torno da coluna foi retirado para facilitar a extração da coluna de solo. As colunas foram fechadas em sua base com telas de nylon (sombrite) presas com borracha para minimizar perdas de material da amostra e ao mesmo tempo permitir a posterior coleta do lixiviado.

As colunas foram então envoltas em sacos plásticos pretos e acondicionadas na posição vertical para que durante o transporte não houvesse alterações em sua estrutura até a chegada ao local da realização do experimento.

### 3.2.1 Atributos Químicos do Solo

Os atributos químicos do solo foram obtidos a partir de análises de rotina feitas no Laboratório de Solos da FAMEV de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Yeomans e Bremner (1980), enquanto o nitrogênio total foi determinado pelo método de Bremner e Mulvaney (1982).

Para a realização de análise multielementar visando à identificação e quantificação de metais pesados totais (Cd, Ni, Cr e Pb), foi utilizada a técnica de Espectrometria de Raios X por Dispersão em Energia (EDXRF). Os micronutrientes Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis foram extraídos em solução Mehlich-1 e determinados em espectrofotômetro de absorção atômica.

TABELA 1 – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

ATRIBUTO	UNIDADE	RESULTADO
pH (CaCl <sub>2</sub> )		5,85
Condutividade Elétrica	$\mu\text{s cm}^{-1}$	6,96
Alumínio		0,15
Acidez potencial	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	2,66
Ca + Mg		1,00
TpH7		3,73
t	$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	1,22
Soma de bases		1,07
Saturação por bases		28,10
Saturação por alumínio	%	14,52
Fósforo (P)		14,36
Potássio (K)	$\text{mg dm}^{-3}$	13,05
Sódio (Na)		28,16
Matéria orgânica	$\text{dag kg}^{-1}$	2,12
Nitrogênio total	$\text{g kg}^{-1}$	17,36
Cobre (Cu)		1,86
Zinco (Zn)	$\text{mg dm}^{-3}$	4,46
Manganês (Mn)		12,70
Ferro (Fe)		47,66

### 3.3 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

O lodo de esgoto foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Sanecap (Companhia de Saneamento da Capital – MT) do Núcleo Habitacional Sucuri de Cuiabá. A estação conta com sistema Uasb, chamado no Brasil de Dafa (Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente) de tratamento de esgoto. Procedeu-se à coleta nos tubos de controle de nível do lodo de esgoto do sistema. A análise do lodo seguiu a metodologia descrita pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para análise de fertilizantes orgânicos (BRASIL, 2007), estando os resultados na Tabela 2.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DO LODO DE ESGOTO

DETERMINAÇÃO	UNIDADE	MATÉRIA NATURAL	MATÉRIA SECA
pH CaCl <sub>2</sub>	-	6,8	-
Umidade (a 65° C)		97,54	-
Umidade (a 105° C)		97,66	-
Nitrogênio total		1,74	74,32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	%	0,03	1,09
K <sub>2</sub> O total		0,01	0,52
Cálcio (Ca) total		0,02	0,71
Magnésio (Mg) total		0,00	0,16
Enxofre (S) total		0,01	0,60
Zinco (Zn) total		11,30	483,73
Cobre (Cu) total		2,17	92,89
Manganês (Mn) total		3,51	150,26
Boro (B) total		4,48	191,87
Ferro (Fe) total	mg kg <sup>-1</sup>	523	22367,29
Cádmio		-	<0,0004
Níquel		-	0,9
Chumbo		-	1,0
Cromo		-	16,6
Alumínio		-	185,3
Sódio total	mg L <sup>-1</sup>	40	-
Matéria Orgânica		11,52	-

### 3.4 ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

Na casa de vegetação, as colunas foram dispostas em dois suportes de madeira, cada um com capacidade para até 10 colunas. Para a coleta do lixiviado, drenos plásticos (funis) foram acoplados na base das colunas. Garrafas plásticas de 500 mL de capacidade foram colocadas abaixo dos funis. As garrafas tiveram suas tampas perfuradas no tamanho exato da saída do funil para que ficassem encaixados.

As colunas, assim como as garrafas de coleta de lixiviado, foram identificadas, conforme a dose e repetição. Concluída a etapa de preparação das colunas, iniciou-se a aplicação das doses de lodo. O lodo líquido, previamente analisado, foi aplicado nos tubos nas quatro doses (0; 2,5; 5 e 7,5 t ha<sup>-1</sup>), simulando a disposição do resíduo na superfície.

Para o cálculo da quantidade de lodo necessária, foi feita análise da sua densidade para possibilitar a aplicação da quantidade

equivalente ao peso do lodo seco. Para a aplicação do lodo, foi utilizado um regador de plástico.

As colunas com o solo ficaram em repouso durante 10 dias após a aplicação do lodo. Passado esse período, sobre cada coluna foi aplicada água destilada simulando a quantidade de chuva observada na região de Cuiabá no mês mais chuvoso do ano (210 mm de chuva em janeiro), sendo, portanto, aplicados a cada 10 dias 550 mL de água em quatro aplicações, em cada coluna. A cada aplicação, o líquido drenado na base das colunas foi coletado e colocado em refrigeração para posterior análise. Foram realizadas ao todo quatro aplicações de chuva simulada. Terminado o ensaio de lixiviação, o solo foi coletado nas colunas de PVC para análise de nutrientes e metais retidos no solo.

### 3.5 ANÁLISES QUÍMICAS

#### 3.5.1 Análises da Água Percolada

As análises da água percolada pelas colunas de lixiviação foram feitas no Laboratório de Solos/FAMEV e no Laboratório de Análise de Metais Pesados/Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas e da Terra da UFMT.

Para leitura de sódio e potássio, foi utilizada fotometria de chama. Para análise da condutividade elétrica, seguiu-se a metodologia proposta por Camargo et al. (1986). Para a determinação dos ânions, as amostras de água foram filtradas em membrana porosa de 0,45  $\mu\text{m}$  e as leituras realizadas num cromatógrafo iônico Dionex Modelo ICS 90, eluente carbonato:bicarbonato (1:2 mmol), coluna AS14A, do Laboratório de Metais Pesados do Departamento de Química da UFMT.

### 3.5.2 Análises do Solo

As análises do solo retirado das colunas de lixiviação foram realizadas no Laboratório de Solos da FAMEV, conforme metodologia utilizada para caracterização química do solo natural (item 3.2.1).

### 3.6 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo empregadas metodologias diferenciadas para o solo e para o lixiviado.

Para o solo, os tratamentos foram quatro doses de lodo de esgoto, equivalentes a 0 (Testemunha), 2,5 (Dose 1), 5 (Dose 2) e 7,5 t ha<sup>-1</sup> (Dose 3) de lodo seco em quatro repetições.

Os tratamentos, em relação ao lixiviado, foram distribuídos em parcelas subdivididas no tempo que consistiram nas quatro doses de lodo como tratamento, quatro repetições e quatro períodos de coleta (aplicações de chuva simulada), sendo realizadas a cada dez dias.

### 3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas empregando-se o software STATISTICA 5.0, tendo sido feita a avaliação da normalidade dos resíduos utilizando-se o teste de Shapiro-Wilk. Posteriormente, para a avaliação da homogeneidade das variâncias, procedeu-se ao Teste de Bartlett e, quando necessário, os dados foram transformados.

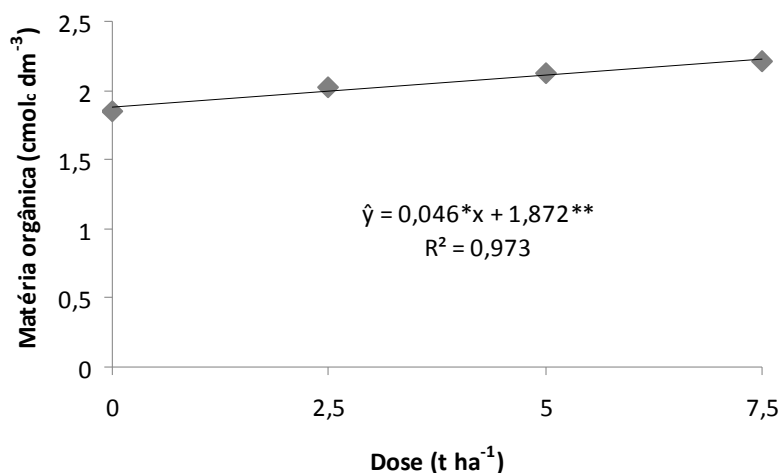
Em seguida foi empregada a análise de variância (ANOVA), sendo que, para o delineamento inteiramente casualizado em parcelas subdivididas no tempo para os dados de água, os dados quantitativos foram analisados empregando-se análise de regressão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ALTERAÇÕES NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE DOSES DE LODO

#### 4.1.1 Matéria Orgânica

A concentração de matéria orgânica aumentou linearmente em relação às doses de lodo de esgoto, variando de 1,87 na Dose 0 (testemunha) a 2,21 dag kg<sup>-1</sup>, na maior dose de lodo (Figura 1). Os resultados de matéria orgânica estão de acordo com os encontrados por Oliveira et al. (2002) e Gomes et al. (2005), que também observaram aumento linear de matéria orgânica com a aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto. Esse resultado era esperado, uma vez que o lodo de esgoto é reconhecido como fonte de matéria orgânica, componente fundamental para produção em solos intemperizados como o LATOSSOLO.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 1 – MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.



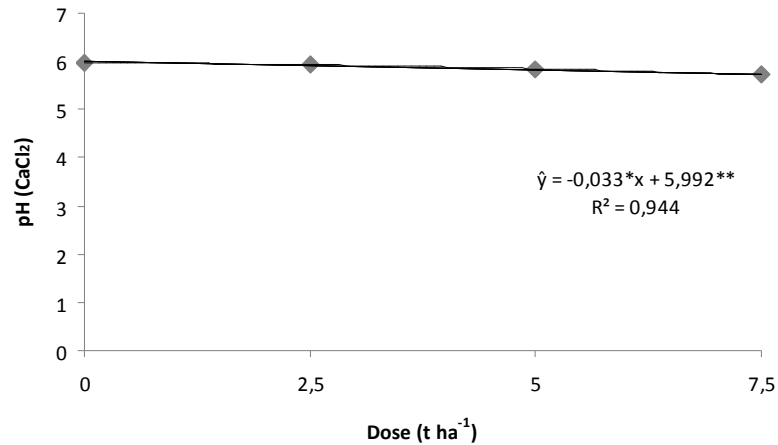
#### 4.1.2 pH

Observou-se que o pH diminuiu linearmente de 5,97 na testemunha (Dose 0) para 5,73 na maior dose de lodo aplicada (Figura 2). Galdos et al. (2004) observaram diminuição do pH de 5,43 para 4,96 ao longo de um ano. Segundo os autores, um fator que pode ter contribuído para essa redução é a produção de ácidos orgânicos e inorgânicos, como  $H_2SO_4$  e  $HNO_3$ , pela decomposição da matéria orgânica do lodo e pela atividade microbiana.

Segundo Marques et al. (2001), na decomposição da matéria orgânica do solo, em seu estágio inicial, o pH diminui e com passar do tempo isso se inverte. Hussein (2009) também observou decréscimo do pH e atribuiu à produção de ácidos orgânicos pela decomposição do lodo de esgoto aplicado.

Outro fator que justifica o decréscimo do pH é o processo de transformação por que passa o nitrogênio desde a amonificação até a nitrificação. Na nitrificação, íons  $H^+$  são gerados de modo a acidificar o meio. Samaras et al. (2008) também atribuíram a diminuição do pH ao processo de nitrificação.

Outra possibilidade está relacionada à presença de alumínio, elemento rico no lodo estudado, que pode se hidrolisar produzindo íons  $H^+$ . Segundo Meurer et al. (2010), o alumínio em solução aquosa, por meio de uma sequência de reações de hidrólise, se precipita sob a forma de  $Al(OH)_3$ , produzindo íons  $H^+$ . Figueiredo et al. (2007) consideram que o alumínio provoca acidez nos solos sob Cerrado.

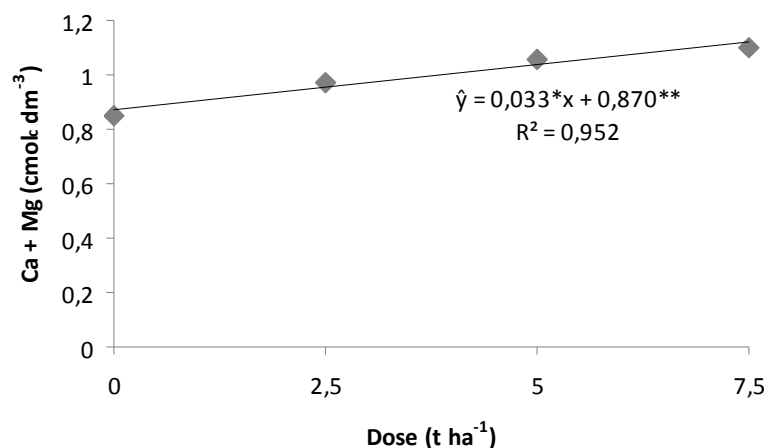


\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 2 - pH DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.1.3 Ca + Mg

O teor de Ca e Mg aumentou linearmente de 0,87 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na testemunha para 1,11 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na maior dose de lodo de esgoto aplicada (Figura 3). Trannin et al. (2005) também observaram diminuição do pH e aumento nos teores de Ca e Mg, soma de bases e saturação por bases. E considerando que o lodo possuía baixos teores de Ca, Mg e K, os autores atribuíram o aumento à proximidade da adição de calcário à área do estudo, o que não ocorreu neste estudo, uma vez que se trata de experimento em casa de vegetação. Sendo assim, o aumento de Ca e Mg pode ter ocorrido pela presença de Ca e Mg no lodo e sua liberação da matéria orgânica através de sua decomposição.



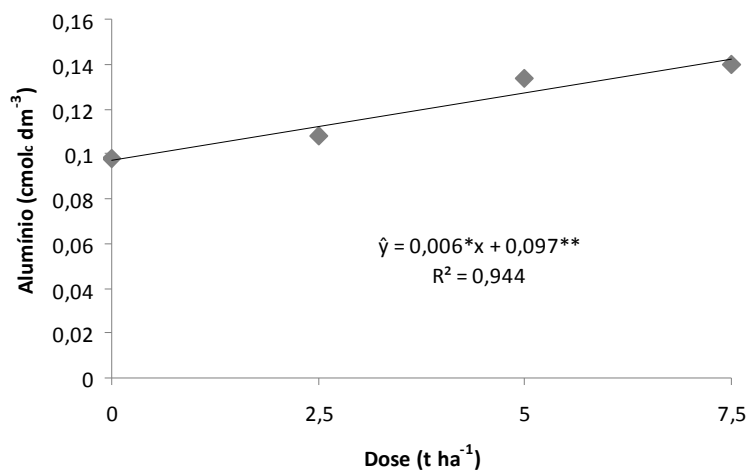
\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 3 – Ca + Mg DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

Com relação ao poder de retenção da matéria orgânica, segundo Gatiboni (2010), ela tem área superficial específica muito maior que os argilominerais e, conseqüentemente, maior quantidade de cargas expostas, o que aumenta a retenção de cátions básicos como cálcio e magnésio nas camadas de solo mais ricas em matéria orgânica.

#### 4.1.4 Alumínio

As concentrações de alumínio aumentaram linearmente com o aumento da dose de lodo de 0,09 na testemunha para 0,14 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na maior dose aplicada (Figura 4). O aumento na concentração desse metal era esperado, uma vez que o resíduo utilizado era rico em alumínio (Tabela 2). O maior teor de Al<sup>3+</sup> trocável e o menor valor de pH ocorreram com a aplicação da dose máxima de lodo, confirmando resultados de Trannin et al. (2008). Segundo os autores, a aplicação de lodo ao solo promove a diminuição do pH, aumento da acidez potencial e do Al trocável, e isso se deve, em parte, ao fato de o lodo ser produzido sem adição de calcário, tendo, por isso, baixa eficiência corretiva.

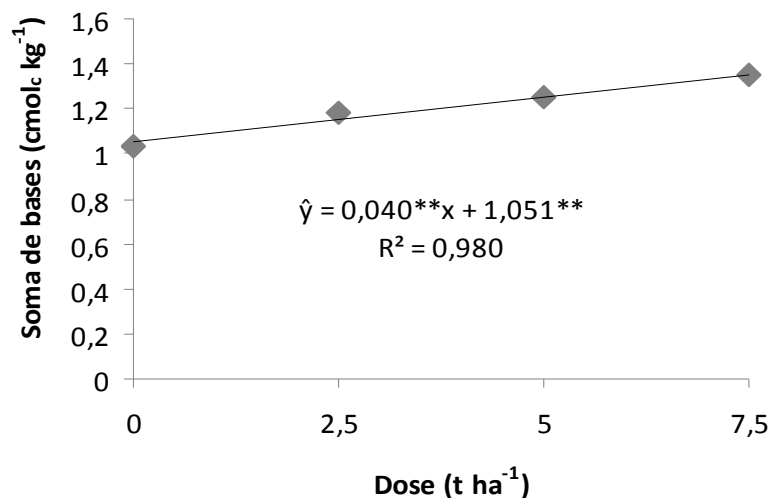


\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 4 - ALUMÍNIO DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.1.5 Soma de Bases (SB)

A soma de bases aumentou linearmente de 1,05 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na testemunha (Dose 0) até 1,35 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na maior dose de lodo aplicada (Figura 5). Esse aumento ocorreu possivelmente devido ao incremento nos teores de Ca e Mg no solo, uma vez que a soma de bases é a soma dos teores de Ca, Mg, Na e K. Os resultados confirmam aqueles encontrados por Trannin et al. (2008), que destacaram que a elevação dos teores desses cátions promove incrementos na soma de bases (S) e na CTC efetiva (t) em resposta às doses de bio sólido. Silva et al. (2001), também atribuíram o aumento na SB a quantidade de Ca e Mg acrescentadas ao solo.

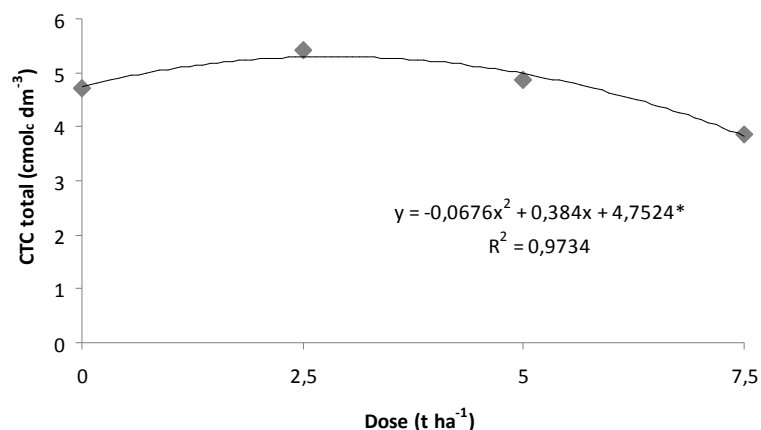


\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 5 – SOMA DE BASES DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.1.6 CTC

A CTC seguiu tendência quadrática, sendo que o maior valor de CTC (5,30 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) foi obtido com a dose de 2,86 t ha<sup>-1</sup> de lodo (Figura 6). Matematicamente, a CTC é fruto da soma das bases dividida pela acidez potencial do solo. A CTC acompanhou a mesma tendência de queda da acidez potencial, apesar do aumento nas concentrações de Ca e Mg disponíveis. A acidez potencial pode ser considerada a acidez da fase sólida do solo. Conforme Meurer et al. (2010), o alumínio trocável adsorvido às cargas negativas das argilas, os grupos funcionais COOH e OH da matéria orgânica e OH<sub>2</sub> e OH ligados a superfícies dos óxi-hidroxidos de ferro e alumínio e os existentes nas bordas dos argilominerais podem se dissociar em íons H<sup>+</sup>. Assim, pode ter havido dissociação de íons H<sup>+</sup> diminuindo o hidrogênio do solo e aumentando o hidrogênio em solução, com consequente diminuição da CTC.



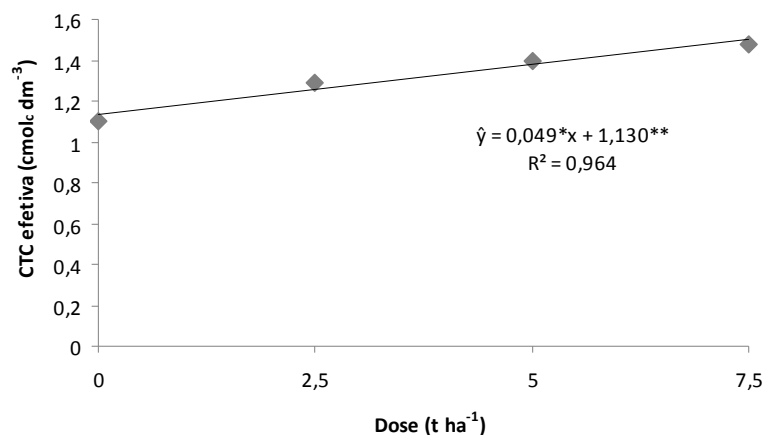
\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 6 – CTC TOTAL DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.1.7 CTC Efetiva

A CTC efetiva aumentou linearmente de 1,13 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> na testemunha para 1,49 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> na maior dose de lodo aplicada (Figura 7). A elevação nos teores de Ca, Mg e Al pode explicar o aumento na CTC efetiva do solo, pois esse atributo matematicamente corresponde à soma de bases trocáveis mais o alumínio.

O aumento da CTC efetiva, possivelmente, se deu pelo incremento de matéria orgânica no solo, uma vez que, segundo Bezerra et al. (2006), a maior influência da matéria orgânica nas propriedades químicas do solo está na alteração do seu complexo coloidal. Assim, a matéria orgânica influencia a CTC por aumentar o número de cargas superficiais negativas e, conseqüentemente, pela maior retenção de cátions.

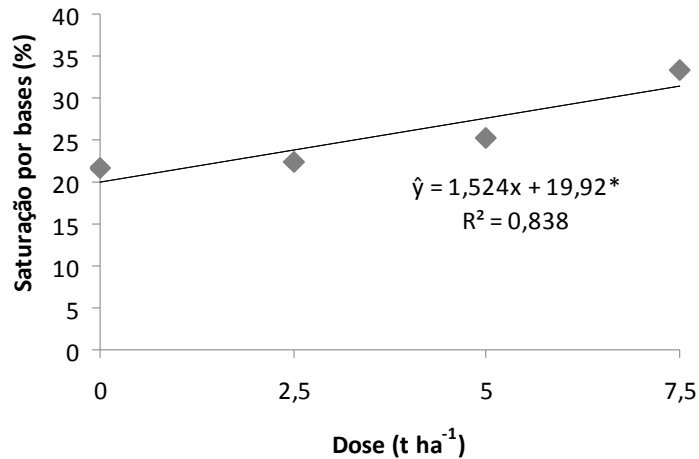


\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 7 – CTC EFETIVA DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.1.8 Saturação por Bases (V %)

A saturação por bases aumentou linearmente de 19,92 % na testemunha (Dose 0) para 31,35 % na maior dose de aplicação de lodo (Figura 8). Silva et al. (2001) e Chueri et al. (2007) atribuíram o aumento na saturação por bases do solo ao incremento de Ca e Mg no solo proporcionado pela adição de lodo. O Ca e Mg na forma de carbonatos podem ter neutralizado os íons H<sup>+</sup> das fontes potenciais de acidez do solo pela geração de moléculas OH<sup>-</sup>. Segundo Meurer et al. (2010), à medida que os íons H<sup>+</sup> são neutralizados no solo, os sítios de troca do solo, nas superfícies dos minerais e da matéria orgânica, vão sendo ocupados pelos cátions Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup>, aumentando, assim, a saturação por bases.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 8 – SATURAÇÃO POR BASES DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

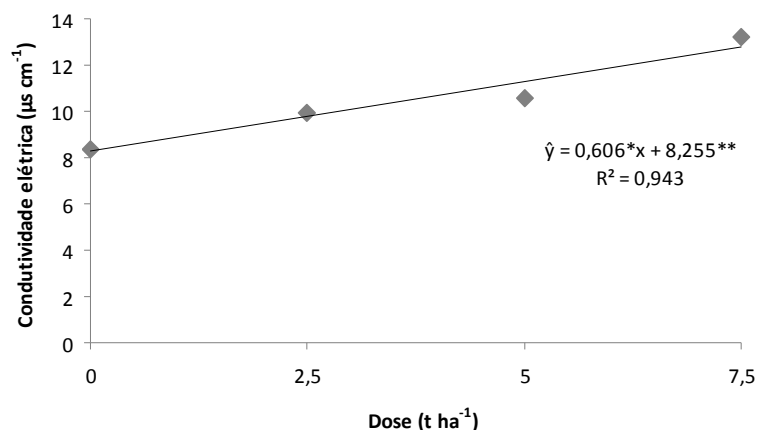
#### 4.1.9 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica aumentou linearmente com o aumento das doses de lodo do esgoto (Figura 9). Messias et al. (2007) também observaram diminuição do pH e aumento da CE. Isso ocorreu possivelmente devido à ocupação dos sítios de troca do solo por alguns íons que elevam esse atributo.

A condutividade elétrica do solo natural foi 8,25  $\mu\text{s cm}^{-1}$  chegando a 12,8  $\mu\text{s cm}^{-1}$  na maior dose de lodo aplicada. O aumento na condutividade elétrica em função das doses evidencia aumento na concentração de íons no solo.

De acordo com Luchese (1998), a aplicação de lodos de esgoto ricos em sais solúveis proporciona aumento da condutividade elétrica (CE) dos solos, atribuindo Bettiol e Fernandes (2004) esse aumento da condutividade elétrica ao aporte de  $\text{N-NO}_3^-$ . Hussein (2009) atribuiu o aumento da condutividade elétrica à alta presença de sais no lodo de esgoto.





\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 9 – CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

## 4.2 CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES E DE METAIS PESADOS EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO

### 4.2.1 Nitrogênio

Apesar de estar em elevada quantidade no lodo de esgoto estudado, não se observou diferença no teor de nitrogênio em função da dose de lodo aplicada. O curto período do experimento pode ter influenciado a disponibilidade do nitrogênio no solo. Segundo Pierzynski (1994)<sup>1</sup>, citado por Deschamps e Favaretto (1999), em geral, apenas 10 a 40 % do N orgânico aplicado ao solo, via lodo de esgoto, é disponibilizado no primeiro ano de cultivo.

Outra hipótese é de que o nitrogênio total analisado, oxidado na forma de nitrato, teria lixiviado, sendo levado do perfil do solo. De acordo com Melo et al. (2001), o nitrogênio orgânico para se tornar disponível necessita passar pelo processo de mineralização, que leva à formação do íon amônio, e em seguida, pelo processo de nitrificação,

<sup>1</sup> PIERZYNSKI, G. M.; SIMS, J. T. e VANCE, G. F. Soils and environmental quality. Boca Raton, Lewis Publishers, 1994. 313p.

dando origem ao íon nitrato. O íon nitrato, por possuir carga negativa, é lixiviado pelo perfil do solo, representando elevado potencial para poluir águas subterrâneas.

A Companhia de Saneamento do Paraná (1997) também destaca, em seu manual técnico de utilização agrícola do lodo de esgoto, que o nitrogênio pode ser usado como fator limitante para a dosagem máxima de lodo a ser aplicado ao solo, pois pode lixiviar em forma de nitratos e contaminar o lençol freático, fato também citado por Meurer (2006).

Os resultados do ânion nitrato analisado no lixiviado deste experimento reforçam a idéia de que o nitrogênio, na forma de nitrato, teria percolado pelo perfil do solo, uma vez que os teores do ânion foram crescentes em relação às doses e também com as aplicações de chuva simulada. Os níveis de nitrato na maior dose de aplicação de lodo aumentaram quase três vezes em relação à testemunha, e no caso das aplicações de chuva simulada, houve aumento de até 6,0 vezes em relação à primeira aplicação. Os resultados de nitrato no lixiviado são apresentados no item 4.3.6 desse trabalho. Nesse caso, admite-se que a taxa de mineralização do nitrogênio foi alta, uma vez que grande quantidade de nitrato ficou disponível no tempo de duração do experimento. Isso possivelmente se deve à baixa relação C/N do lodo, pois, conforme Coelho (1973), a mineralização ocorre quando o teor de carbono é baixo em relação ao nitrogênio, caso desse experimento (Tabela 2).

#### 4.2.2 Fósforo

Não se observou alteração nos teores de fósforo no solo em função das doses de lodo aplicadas, sendo que a quantidade de P presente no lodo de esgoto utilizado possivelmente não foi suficiente para alterar a concentração desse elemento.

Galdos et al. (2004) atribuíram a ausência de aumento na concentração de fósforo no solo à forte retenção de fosfatos em solos tropicais, que são ricos em óxidos de Fe e Al. Uma das características dos LATOSSOLOS é possuir consideráveis níveis de Fe e Al, que podem ter sido responsáveis pela insolubilização do P.

#### 4.2.3 Potássio

Com relação à dose de lodo aplicada, o potássio disponível não se alterou, possivelmente pelo seu baixo teor no lodo. Melo et al. (2001), Samaras et al. (2008) e Luchese (1998) também não observaram alterações na concentração de potássio, que atribuíram ao baixo teor desse nutriente encontrado no lodo.

#### 4.2.4 Sódio

Não houve alteração nos teores de sódio no solo em função da aplicação das doses de lodo de esgoto, sendo que Madalão et al. (2009) também não observaram aumento do sódio com a adição de doses de lodo de esgoto, atribuindo o fato à concentração de sódio no lodo não ser significativa a ponto de mostrar variabilidade entre as diferentes dosagens aplicadas. Sendo assim, o teor de sódio no lodo estudado ( $40 \text{ mg L}^{-1}$ ) pode não ter sido suficiente para causar diferenças em relação às doses.

#### 4.2.5 Ferro

Não houve alteração nos teores de ferro no solo em função das aplicações de lodo de esgoto apesar de o Fe ter sido um dos elementos mais abundantes encontrados no lodo de esgoto estudado, com aproximadamente  $22,5 \text{ g kg}^{-1}$ .

Segundo Motta et al. (2007), assim como o Mn, o Fe, quando aplicado ao solo, se encontra em quantidade muito baixa em solução, e isso se deve à oxidação da forma reduzida de  $Fe^{+2}$ , sendo essa, sem dúvida, a mais importante reação para o Fe, interferindo na eficiência e no efeito residual do Fe aplicado, mesmo quando aplicado em altas doses. A rápida formação de compostos de baixa solubilidade no solo através da oxidação deixa muito pouco Fe em solução, conseqüentemente menos sujeito a lixiviar no solo. Além disso, a matéria orgânica contida no biossólido pode ter complexado o ferro pela sua grande afinidade com as substâncias húmicas (Silva et al., 2010).

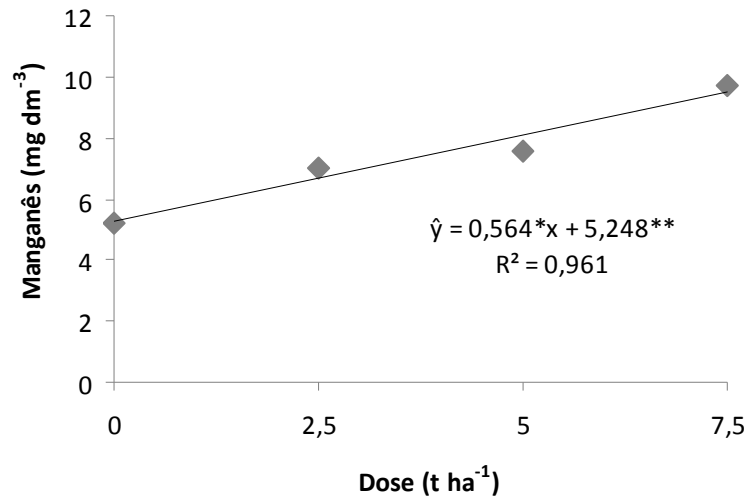
#### 4.2.6 Manganês

O manganês, em comparação ao ferro, não esteve em altas quantidades no lodo de esgoto estudado (Tabela 2), mas ainda assim o teor desse elemento aumentou linearmente (Figura 10) em relação às doses aplicadas. Isso ocorreu possivelmente pelo fato de a quantidade de manganês disponível no solo natural ( $12,70 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ser baixa em relação ao ferro ( $47,66 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Semelhantemente ao que acontece com o  $Fe^{+2}$ , o  $Mn^{+2}$  (forma reduzida) aplicado ao solo difere do  $Mn^{+4}$  (forma oxidada), mais frequentemente observada nos solos, e está sujeito à oxidação (MOTTA et al., 2007). Segundo o mesmo autor, o efeito residual do Mn é curto, indicando que as reações do elemento com a matéria orgânica são mais fracas ou os compostos formados têm maior solubilidade e disponibilidade que os de Fe, fato esse que pode explicar por que houve aumento na disponibilidade do Mn, mas não houve aumento significativo para o Fe.

O pH do solo é fator primário responsável pela quantidade de manganês disponível no solo (COELHO, 1973). Sendo assim, a diminuição do pH pode ter influenciado o aumento do nível de manganês. Como exemplo, citam-se Simonete e Kiehl (2002), que atribuíram o

aumento da concentração de Mn à diminuição do pH e à quantidade de Mn nativo no solo.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

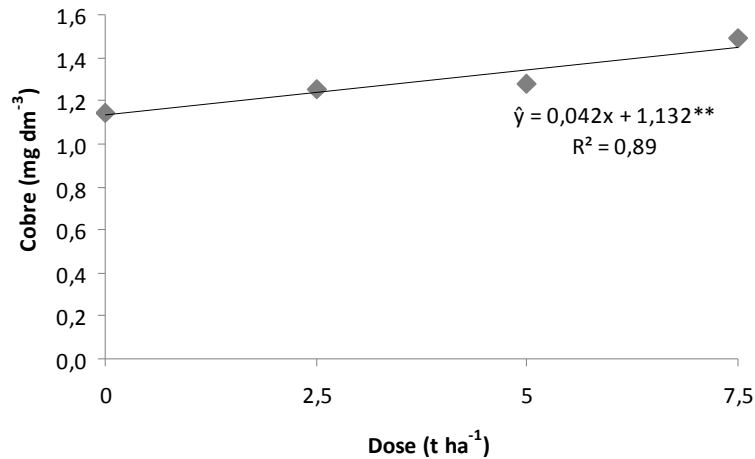
FIGURA 10 - MANGANÊS DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.2.7 Cobre

Os teores de cobre aumentaram linearmente em relação à dose de lodo aplicada, com variação de 1,13 na testemunha (Dose 0) a 1,44 mg dm<sup>-3</sup> na maior dose aplicada (Figura 11). O leve aumento na acidez do solo provocado pelo uso do lodo de esgoto pode ter influenciado os teores disponíveis de cobre. Messias et al. (2007) observaram a mesma tendência do Cu em relação ao pH, possivelmente porque, segundo Coelho (1973), o teor de cobre é aumentado com o aumento da acidez.

Outro fator que pode ter influenciado o aumento nos teores de cobre, segundo Camargo et al. (2006), é a mineralização da matéria orgânica, que pode liberar cobre para a solução. Apesar do aumento, os teores de cobre estiveram muito abaixo do valor de referência para o

solo, que é de  $60 \text{ mg kg}^{-1}$ , estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 11 - COBRE DO SOLO NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO DE ESGOTO.

#### 4.2.8 Zinco

De modo semelhante ao ferro, o zinco, apesar de estar em elevada quantidade no lodo de esgoto utilizado ( $483 \text{ mg kg}^{-3}$  em matéria seca), não teve alterações em relação à dose de lodo aplicada, possivelmente porque, segundo Ferraz et al. (2010), o Zn possui um alto efeito residual em solos muito intemperizados, ligando-se preferencialmente à fração argila. De acordo com Silveira (2002), aliado ao seu alto poder residual, o Zn tem uma alta afinidade pela matéria orgânica.

Oliveira (1995), estudando o efeito de doses de lodo de esgoto (0, 50, 100 e  $150 \text{ t ha}^{-1}$ ) em NEOSSOLO Quartzarênico e NITOSSOLO sob dois níveis de pH, observou aumento na disponibilidade de zinco para a maior dose aplicada, sendo que a maior dose utilizada no presente experimento foi de apenas  $7 \text{ t ha}^{-1}$ .

De acordo com Harter (1979)<sup>2</sup>, citado por Motta (2007), o  $Zn^{+2}$  está sujeito, em sua grande maioria, à forte retenção nos compostos do solo e à adsorção específica ou adsorção química, tanto nos compostos orgânicos quanto nos inorgânicos. Adsorção específica caracteriza-se pela ocorrência de ligações de caráter covalente, simples ou múltiplas, entre um elemento químico e os pontos hidroxilas das argilas silicatadas e oxídicas ou com radicais hidroxilas dos grupos carboxílicos, aminas e outros da matéria orgânica. Dessa forma, a adsorção de tais elementos não depende diretamente do número de carga (CTC), assim como ocorre com  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$ . Isso explicaria a alta adsorção do Zn, mesmo não havendo aumento significativo na CTC a pH 7.

Para Motta (2007), a predominância da adsorção específica com elevada força para o zinco dá a ele baixa mobilidade no solo, baixa recuperação por extratores químicos, baixos teores em solução, alto efeito residual e efeito acumulativo quando aplicado continuamente no solo.

Gadde e Laitinen (1974)<sup>3</sup>, citados por Camargo (2006), mostraram que os óxidos de ferro e manganês adsorvem uma quantidade considerável de zinco, sendo esta adsorção específica. Outro fator muito importante na adsorção do zinco em superfícies de óxidos, segundo Camargo (2006), é a presença do íon fosfato no meio, uma vez que os autores Stanton e Burger (1967,1970) observaram que a presença de fosfato aumentou a adsorção de zinco por óxidos de ferro e alumínio amorfos.

O zinco, mesmo considerando os valores do solo natural, teve níveis bem abaixo dos considerados tóxicos (25 a 94 mg  $kg^{-1}$ ) para

---

<sup>2</sup> HARTER, R. D. Adsorption of copper and lead by Ap and B2 horizons of several Northeastern United States soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 679-683, 1979.

<sup>3</sup> GADDE, R. R. e LAITINEN, H. A. Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese oxides. *Analytical Chemistry*, Washington, 46, 1974.

culturas como arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo sob Cerrado (FAGERIA, 2000).

#### 4.2.9 Cádmio, Níquel, Chumbo e Cromo

As concentrações dos metais Cd, Ni, Pb e Cr estiveram abaixo do limite de detecção da Técnica de Espectrometria de Raios X por Dispersão em Energia, portanto, bem abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, que estabelece valores orientadores de qualidade do solo. Oliveira e Mattiazzo (2001), Simonete e Kiehl (2002) e Pigozzo et al. (2004) também não observaram presença desses metais e, por consequência, não obtiveram resultados conclusivos sobre sua retenção.

#### 4.2.10 Sequência da concentração média de metais pesados no solo

A sequência da concentração média de metais pesados no solo em estado natural foi de  $Fe > Mn > Zn > Cu$ , enquanto a sequência de concentração do lodo de esgoto foi de  $Fe > Zn > Mn > Cu$ . As concentrações dos elementos no lodo estão na Tabela 2. A concentração média dos metais pesados detectados no solo tratado com doses de lodo do esgoto teve a seguinte sequência em relação às doses de lodo aplicadas: Dose 0 e 1 –  $Fe > Mn > Zn > Cu$ ; Dose 2 e 3 -  $Fe > Zn > Mn > Cu$ .

De acordo com a sequência da concentração dos metais retidos no solo para todos os tratamentos, o ferro foi o cátion mais retido e o cobre o menos retido. Observou-se inversão de retenção das doses 0 e 1 em relação às doses 2 e 3 na sequência intermediária em que o Mn foi mais retido, seguido do Zn. Isso provavelmente se deve à maior concentração de zinco presente no lodo de esgoto. Assim, o acréscimo das doses de lodo aplicadas culminou em maior quantidade de zinco

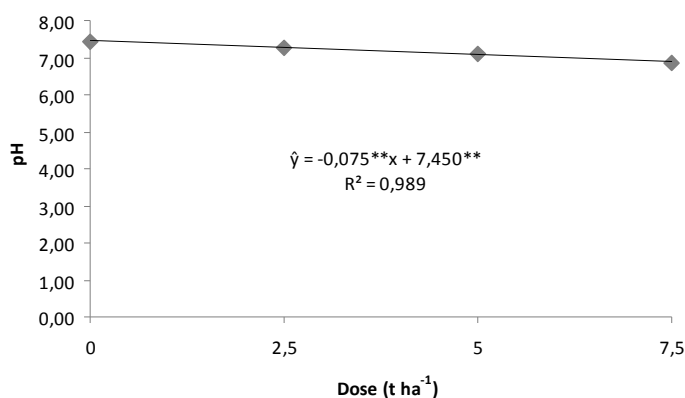


disponível do que de manganês. Ainda assim, o valor do zinco, mesmo para maior dose de lodo aplicada, esteve abaixo do estabelecido pela Resolução CONAMA 420/09.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DA ÁGUA PERCOLADA NA COLUNA DE LIXIVIAÇÃO EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO APLICADAS NO SOLO

##### 4.3.1 pH da Água Percolada

O pH da água percolada diminuiu linearmente em relação às doses de lodo aplicadas, Figura 12, mas não diferiu em relação às aplicações de chuva simulada. Como pode ser observado no item 4.1.2, o pH do lixiviado teve a mesma tendência de diminuição que o pH da solução do solo em relação às doses de lodo aplicadas. Possivelmente, da mesma forma que para o solo, a diminuição desse atributo foi devido ao incremento de matéria orgânica proporcionado pela aplicação das doses de lodo, uma vez que, segundo Galdos et al. (2004), na degradação da matéria orgânica há produção de ácidos orgânicos e inorgânicos, como  $H_2SO_4$  e  $HNO_3$ .

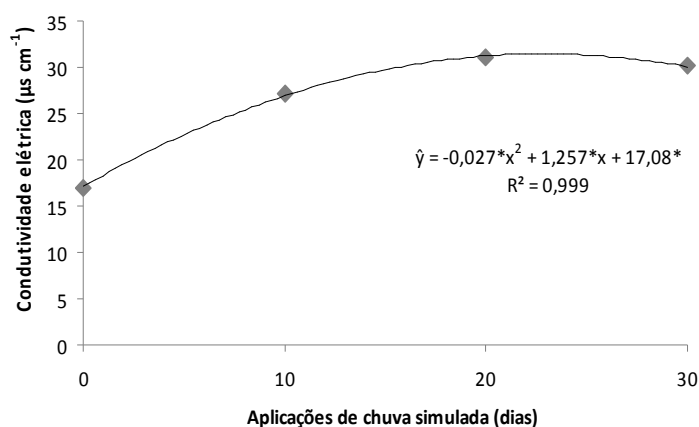


\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 12 - pH DA ÁGUA EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO APLICADAS.

### 4.3.2 Condutividade elétrica

Para condutividade elétrica, houve diferença em relação às aplicações de chuva simulada, mas não para as doses de lodo aplicadas. Os resultados da CE seguiram tendência quadrática, Figura 13, e o ponto de maior valor de condutividade elétrica ocorreu no 23º dia, com valor de 31,71  $\mu\text{s cm}^{-1}$ . O aumento da condutividade elétrica provavelmente ocorreu devido à elevação na concentração de sódio, Figura 19, que acompanhou a mesma tendência da condutividade elétrica.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

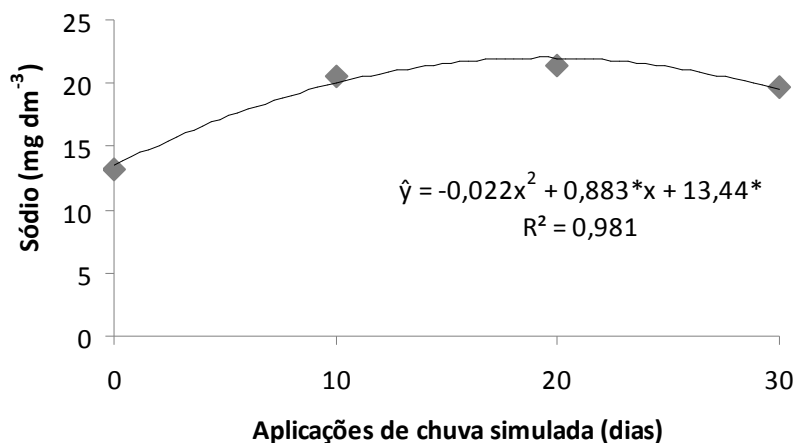
FIGURA 13 - CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM FUNÇÃO DAS APLICAÇÕES DE CHUVA SIMULADA.

### 4.3.3 Potássio

Com relação ao potássio no lixiviado, da mesma forma que ocorreu com o potássio no solo, não se observou diferença em relação às doses de lodo aplicadas. Não foi observada diferença entre as aplicações de chuva simulada. A pouca quantidade desse elemento no lodo de esgoto pode ter sido responsável pela semelhança entre os tratamentos.

#### 4.3.4 Sódio

Houve apenas diferença em relação às aplicações de chuva simulada sobre o sódio, não havendo em relação à dose de lodo aplicada. Os teores de sódio seguiram tendência quadrática, Figura 14, em relação às aplicações de chuva simulada, e o ponto máximo de teor de sódio ocorreu no 23º dia de aplicação, com 28,22 mg L<sup>-1</sup> Na. O aumento foi de aproximadamente 65 % em relação à testemunha, sendo que da terceira para a quarta aplicação os teores de sódio declinaram. Apesar do aumento parcial, todos os teores de sódio estiveram bem abaixo do padrão limite de aceitação de consumo humano indicado pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde, que é de 200 mg L<sup>-1</sup> Na. Como pode ser visto no item 4.2.4, o sódio no solo não teve diferença em relação às doses de lodo aplicadas. A elevação temporária dos níveis de sódio no lixiviado ocorreu possivelmente devido ao aumento nas quantidades de cálcio no solo pela adição do lodo de esgoto. O cálcio compete com o sódio pelos sítios de troca, podendo ter facilitado a remoção do sódio pela lixiviação ao longo do tempo. Isso se explica pelo fato de o cálcio e o magnésio serem bivalentes, enquanto o sódio é monovalente, uma vez que a atração para as proximidades das partículas do solo é dependente da valência dos íons, como citam Meurer et al. (2010). Como não houve aumento de sódio em relação às doses, o aumento na água percolada ocorreu possivelmente pela lixiviação do sódio existente no solo natural.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 14 - CONCENTRAÇÃO DE SÓDIO EM FUNÇÃO DAS APLICAÇÕES DE CHUVA SIMULADA.

#### 4.3.5 Fosfato

O fosfato não foi detectado pelo método analítico empregado, o que significa que, se ele estivesse presente no lixiviado, seria apenas em pequena quantidade, menor do que o limite de quantificação do método. Isso ocorreu possivelmente devido à forte ligação do fosfato às superfícies sólidas do solo por ligação covalente, o que dificulta muito sua troca com outros ânions em solução. E ainda pode ser citado que quanto maiores os teores de argila no solo, maior a quantidade de fósforo quimiossorvido (MEURER et al., 2010), resultando em ausência de fosfato no lixiviado, uma vez que o solo estudado é classificado como argiloso. Deve ser considerado o fato de os LATOSSOLOS sob Cerrado serem conhecidos pelo elevado teor de óxidos de ferro, que têm alta capacidade de retenção de fosfatos.

Paglia (2004) também não detectou presença do ânion nas lixiviações. O autor atribuiu o fato à retenção do fosfato pelo solo, ou à metodologia de análise, que pode não ter sido eficiente na sua faixa de detecção nas soluções lixiviadas.

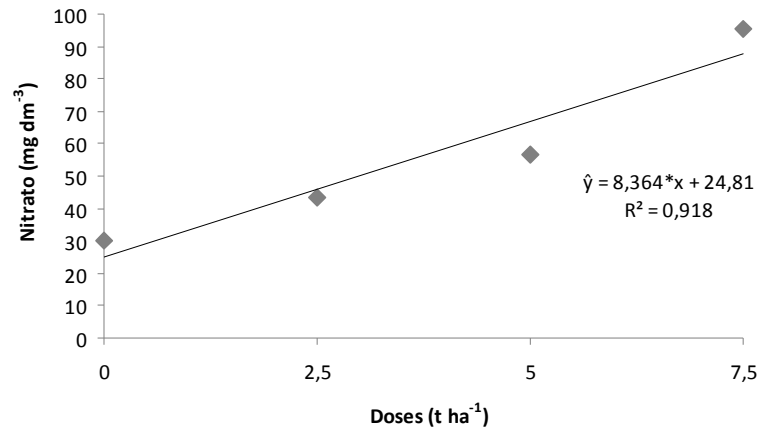
#### 4.3.6 Nitrato

Os teores de nitrato aumentaram linearmente com o aumento das doses de lodo e também no decorrer das simulações de chuva (Figuras 15 e 16). O teor de nitrato na maior dose de lodo aplicada foi quase 3,0 vezes maior em relação à testemunha. No caso das aplicações de chuva simulada, houve aumento de até 6,0 vezes (última aplicação) em relação à testemunha, ou seja, o nitrato foi de uma média de 14,65 mg L<sup>-1</sup>, na primeira lixiviação, para 97,69 mg L<sup>-1</sup> na última lixiviação.

Dynia e Boeira (2000), em experimento com lodo de esgoto num LATOSSOLO VERMELHO, observaram que houve lixiviação de nitrato no solo proporcional às doses usadas. Vieira e Cardoso (2003), trabalhando com LATOSSOLO VERMELHO Distroférico, observaram o mesmo, inclusive com maior lixiviação de nitrato nos tratamentos com doses de lodo de esgoto do que com adubação nitrogenada. Assim, as observações neste estudo e as dos autores citados alertam para o risco de contaminação de águas pelo nitrato quando o lodo de esgoto é utilizado mesmo em doses consideradas pequenas.

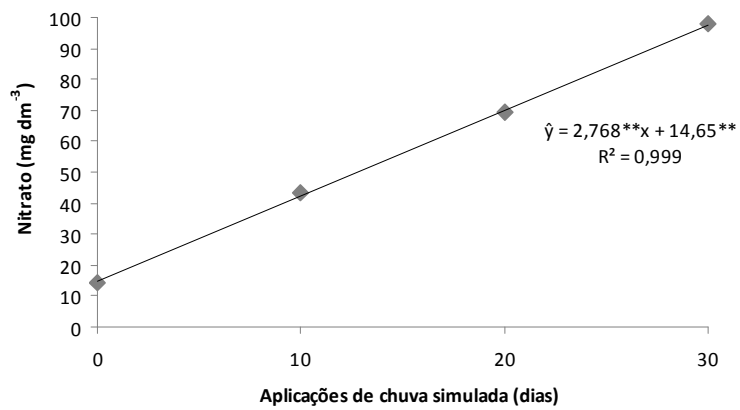
Segundo Costa et al. (2010), a dinâmica de transformação do nitrogênio orgânico em nitrato pode ser muito rápida, considerando que o nitrato é fracamente adsorvido no solo e percola com facilidade no perfil, sendo que isso se deve ao fato de o nitrato possuir cargas negativas como a maioria dos colóides do solo.

Mesmo na testemunha, o nitrato na água lixiviada esteve acima do padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde estabelecido pela legislação vigente, que é de 10 mg L<sup>-1</sup>, podendo isso ser atribuído ao alto valor de nitrogênio total observado no solo natural.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 15 - NITRATO NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DAS DOSES DE LODO.



\*\*significante ao nível de 1%; \*significante ao nível de 5%

FIGURA 16 - NITRATO NA ÁGUA PERCOLADA EM FUNÇÃO DAS APLICAÇÕES DE CHUVA.

## 5. CONCLUSÕES

1. O uso de doses crescentes de lodo de esgoto aumentou a matéria orgânica do solo, o alumínio e a soma de bases, mas diminuiu o pH do solo;
2. As doses de lodo aumentaram os teores de manganês e cobre no solo, mas não alteraram a concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, sódio, ferro e zinco;
3. A partir da dose  $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ , houve perda de nitrato na água percolada; e
4. Os metais pesados não representaram risco de contaminação do solo pela baixa concentração no lodo utilizado.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSE, M. M.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P da. Aspectos tecnológicos e de processos. In: ANDREOLLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (Org.). **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar, Finep, 1999. p.49-119.

ANDRADE, I. P. et al. Impacto do reuso de efluentes de esgoto no lixiviado de solos cultivados com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p.212-216, 2005.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING M. V.; FERNANDES F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. p.319-397.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p.25-35.

BETTIOL, W.; FERNANDES, S. A. P. **Efeito do lodo de esgoto na comunidade microbiana e atributos químicos do solo**. Jaguariúna: EMBRAPA, 2004. (Comunicado Técnico, n.24). 6.p.

BEZERRA, F. B. et al. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.469-476, 2006.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano**. Portaria 518. Brasília, 2004. 15p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Métodos Analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organo-minerais e corretivos**. Instrução Normativa nº 28, de 27 de Julho de 2007.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen total. In: PAGE, A. L. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part. 2. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.595-624.

CAMARGO, O. A. de. Reações e interações de micronutrientes no solo. Infobibos, 2006. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_3/micronutrientes/Index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/micronutrientes/Index.htm)>. Acesso em: 10 nov. 2010.



CAMARGO, O. A. de; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986 (Boletim Técnico, n.106).

CAMARGO, O. A. de; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M. E. et al. (Ed.). **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPQ/FAPESP/POTAFOS, 2001. p.89-124.

CHUERI, W. A.; SERRAT, B. M; BIELE, J.; FAVARETTO, N. Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.5, p. 502–508, 2007.

COELHO, F. S. **Fertilidade do solo**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973. 384p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ - SANEPAR: **Manual Técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. Curitiba: Sanepar, 1997. 96p.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 420/2009**. Disponível em: < [http:// www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br)>. Acesso em: 25 out. 2010.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 375/2006**. Disponível em: < [http:// www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br)>. Acesso em: 25 out. 2010.

COSTA, C. N. et al. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p.197-231.

DESCHAMPS, C.; FAVARETTO, N. Efeito do lodo de esgoto na produtividade e desenvolvimento das culturas. In: ANDREOLLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (Org.). **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar, Finep, 1999. 288 p.

DIONISIO, J. A. et al. Efeito do lodo de esgoto na densidade populacional de organismos do solo. In: ANDREOLLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (Org.). **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar, Finep, 1999. p.193-204.

DOMÉNECH, X. **Química ambiental: El impacto ambiental de los residuos**. 4. ed. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona. Miraguano Ediciones, 1998, 254p.

DYNIA, J. F.; BOEIRA, R. C. **Implicações do uso de lodo de esgoto como fertilizante em culturas anuais: nitrato no solo**. Jaguariúna: EMBRAPA MEIO AMBIENTE, 2000. (Comunicado Técnico, n. 4).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2009. 412p.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.390-395, Campina Grande, 2000.

FERRAZ, F. M.; INOCÊNCIO, M. F.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, A. V. de; VELOSO, M. P. Teores de zinco em solo em função da fonte e forma de aplicação na cultura da soja em Sete Lagoas, MG. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólidos. In: LARA, A. I. et al. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999a. p.8-17.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto. In: LARA, A. I. et al. (Org.). **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999b. p.21-26.

FIGUEIREDO, F. C. Plantas indicadoras da condição de solo. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 8., 2007, Caxambu. **Anais...** Caxambu: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2007, p.1-2.

GALDOS, M. V. et al. Atributos químicos e produção de milho em um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.569-577, 2004.

GATIBONI, L. C. **Propriedades químicas do solo**. Santa Maria: Departamento de Solos - UFSM, 2010. 29 p.

GOMES, S. B. V. et al. Alterações químicas em ARGISSOLO tratado com lodo de esgoto. **Revista Caatinga**, v.18, n.3, p.185-194, 2005.

HUSSEIN, A. H. A. Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop. **Journal of Applied Science**, v.9, p.1401-1411, 2009.

LUCHESE, L. A. C. Características dos bioossólidos e efeitos de sua reciclagem em ambientes edáficos com ênfase na dinâmica de elementos traço. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1, 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p.77-83.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo: Teoria e prática**. 2.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002, 182p.

LUDOVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 6. ed. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Sanepar, 2001. p.123-157.

MADALÃO, J. C. et al. Efeito dos macronutrientes em um solo degradado após aplicação de lodo de esgoto doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRONOMIA, 26, 2009, Gramado. **Anais...** Gramado: Confederação dos Engenheiros Agrônomos do Brasil, 2009.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J. de; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso de bioossólidos na agricultura. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). **Bioossólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001. p.365-404.

MELO, W. J. de; MARQUES, M. O.; MELO, V. P. de. O uso agrícola do bioossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). **Bioossólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001. p.289-364.

MESSIAS, A. S.; SILVA, H. A.; LIMA, V. N.; SOUZA, J. E. G. Avaliação da mobilidade de micronutrientes em solo tratado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional (G&DR)*, v.3, n.3, p.193-211, 2007.

MEURER, E.J. **Fundamentos de Química do solo**. 3.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285p.

MEURER, E. J e ANGHINONI, I. A solução do solo. In: MEURER, E. J. (Ed). **Fundamentos de Química do solo**. 4.ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 266p.

MIYAZANA, M. et al. Efeitos do lodo de esgoto nos teores de metais pesados no solo e na planta. In: ANDREOLLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. (Org.). **Reciclagem de bioossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar, Finep, 1999. p.204-225.

MOTTA, A. C. V.; SERRAT, B. M. REISMANN, C. B. (Ed.) **Micronutrientes na rocha, no solo e na planta**. Curitiba: UFPR, 2007. 242p.

OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num LATOSSOLO VERMELHO Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP.

OLIVEIRA, F. C. **Metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodo de esgoto**. 1995. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. MATTIAZZO; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um LATOSSOLO AMARELO Distroférico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.505-519, 2002.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Mobilidade de metais pesados em um LATOSSOLO AMARELO Distroférico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v.58, n.4, 2001.

OLIVEIRA, J. O. **Estresse hídrico e características agronômicas de materiais precoces de milho**. 2000. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP.

PAGLIA, E. C. **Lodo de esgoto alcalinizado associado a doses de potássio na lixiviação iônica**. 2004. 57p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.

PIGOZZO, A. T. J.; GOBBI, M. A.; SCAPIN, C. A.; LENZI, E.; JUNIOR, L. J.; BREDA, C. C. Disponibilidade de metais de transição no solo tratado com lodo de esgoto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.26, n.4, p.443-451, 2004.

PINTO, M. T. Recuperação de cascalheiras: uma alternativa complementar para reciclagem de biossólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS NO MERCOSUL, 1, 1998, Curitiba. **Anais...** Curitiba, SANEPAR/ABES, 1998. p.93-96.

PRADO, R. de M.; JULIATTI, M. A. Lixiviação de cádmio em profundidade em coluna com LATOSSOLO VERMELHO e NITOSSOLO. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v.78, p.219-226, 2003.

RAIJ, B. V. Pesquisa e desenvolvimento em micronutrientes e metais pesados. In: FERREIRA, et al (Ed.). **Micronutrientes e elementos**

**tóxicos na agricultura.** Jaboticabal: CNPQ/FAPESP/POTAFOS, 2001. p.1-10.

SAMARAS, V. et al. Effects of Repeated Application of Municipal Sewage Sludge on Soil Fertility, Cotton Yield, and Nitrate Leaching. **Agronomy Journal**, v.100, 2008.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, H. B. Z.; PEXE, C. A.; BERNARDES, E. M. Efeitos de lodo de esgoto na fertilidade de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.36, n.5, p.831-840, 2001.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica. In: MEURER, E. J. (Ed). **Fundamentos de Química do solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010. 266p.

SILVEIRA, M. L. A. **Extração sequencial e especiação iônica de zinco cobre e cádmio em LATOSSOLOS tratados com biossólido**. 2002. 166p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SIMONETE, M. A; KIEHL, J. de C. Extração e fitodisponibilidade de metais em resposta à adição de lodo de esgoto no solo. **Scientia Agrícola**, v.59, n.3, p.555-563, 2002.

SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING M. V.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 6.ed. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Sanepar, 2001. p.13-16.

SPERLING, M. V.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; SPERLING M. V.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 6.ed. Belo Horizonte: UFMG - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Sanepar, 2001. p.17-67.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Avaliação agrônômica de um biossólido industrial para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.3, p.261-269, 2005.

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, n.3, p.223–230, 2008.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001a. p.89-132.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de bio sólidos. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Ed.). **Bio sólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001b. p.133-180.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de bio sólido em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.747-758, 2002.

VIEIRA, R. F.; CARDOSO, A. A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com lodo de esgoto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.38, n.7, p.867-874, 2003.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.19, p.1467-1476, 1988.