

ALTINA LACERDA NASCIMENTO

PRODUTIVIDADE, NUTRIÇÃO MINERAL E TEORES DE METAIS
PESADOS NO SOLO E EM GIRASSOL ADUBADO COM LODO DE
ESGOTO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Ciências Agrárias, área de concentração em Agroecologia, do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Reginaldo Arruda Sampaio

Montes claros

2012

N244p
2012

Nascimento, Altina Lacerda.

Produtividade, nutrição mineral e teores de metais pesados no solo e em girassol adubado com lodo de esgoto / Altina Lacerda Nascimento. Montes Claros, MG: ICA/UFMG, 2012.

99 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias, área de concentração em Agroecologia) Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

Orientador: Prof. Regynaldo Arruda Sampaio.

Banca examinadora: José Tadeu Alves da Silva, Leonardo David Tuffi Santos, Luiz Arnaldo Fernandes, Regynaldo Arruda Sampaio.

Inclui bibliografia: 89-99 f.

1. Lodo de esgoto. 2. Adubação – Girassol. I. Sampaio, Regynaldo Arruda. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.8

ALTINA LACERDA NASCIMENTO

**PRODUTIVIDADE, NUTRIÇÃO MINERAL E TEORES DE METAIS
PESADOS NO SOLO E EM GIRASSOL ADUBADO COM LODO DE
ESGOTO**

Dr. José Tadeu Alves da Silva
(EPAMIG)

Prof. Leonardo David Tuffi Santos
(ICA/UFMG)

Prof. Luiz Arnaldo Fernandes
(ICA/UFMG)

Prof. Regynaldo Arruda Sampaio
Orientador (ICA/UFMG)

Aprovada em 07 de fevereiro de 2012.

DEDICO

Aos meus familiares

Aos meus amigos

AGRADECIMENTOS

À Deus, por mais essa vitória.

Ao orientador Prof. Reginaldo Arruda Sampaio, pela orientação, pelo incentivo, pela dedicação, pela confiança e, principalmente, pelos momentos que aconselhou-me, não só em questões acadêmicas. Orientador é uma palavra que bem o define. Meus sinceros agradecimentos.

Ao co-orientador Prof. Luiz Arnaldo Fernandes.

Aos demais professores e funcionários do ICA/UFMG, pela amizade e colaboração na execução do trabalho.

Ao Aldemar (Baia), João Paulo, Zuba, Sueli, Márcio, Hermann, Guilherme e todos os demais integrantes do NEAAR, sem os quais não teria sido possível conduzir esse trabalho.

À Natália e Cristiane, pois, além de colegas de trabalho, tornaram-se grandes amigas.

Aos meus amigos Antônio, Ágatha, Thamara, Vinícius e Izabel pelo companheirismo e amizade.

Aos meus pais Luiz e Cleri, meus irmãos Joaquim, Márcia e Elzeli, meus sobrinhos Thiago, Thais, Vinicyus, Mariana, Felipe e Ana Livia e a Antônio, por sempre estarem ao meu lado, dando-me força.

À todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para conclusão dessa importante etapa da minha vida.

À CAPES/PROCAD pelo mestrado sanduíche na UFRRJ.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pelo apoio financeiro, tornou possível a condução desta pesquisa.

LISTA DE TABELAS

1 - Características químicas do lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado utilizados no experimento.....	37
2 - Teores de metais pesados no lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado e nos adubos químicos utilizados no experimento.....	38
3 - Produtividade e teores de nutrientes no solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto.....	40
4 - Teores de nutrientes na folha e no pecíolo de girassol em resposta à aplicação de fertilizante mineral e Lodo de esgoto tratado de diferentes formas.....	45
5 - Atributos do solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e Lodo de esgoto tratado de diferentes formas.....	48
6 - Teores de metais no solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e Lodo de esgoto tratado de diferentes formas.....	52
7 - Teores de metais pesados na folha e no pecíolo de girassol em resposta à aplicação de fertilizante mineral e Lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas.....	55
8 - Características químicas do lodo de esgoto e quantidades de nutrientes aplicadas com as diferentes doses.....	64
9 - Teores de metais pesados nos adubos químicos e no lodo de esgoto e quantidades aplicadas no solo com as diferentes doses do resíduo.....	64
10 - Valores médios referentes à produtividade de girassol e os teores de nutrientes no solo adubado com fertilizante químico ou com doses de lodo de esgoto.....	67
11 - Valores médios referentes aos teores de nutrientes na folha de girassol adubado com fertilizante químico ou com doses de lodo de esgoto.....	68
12 - Equações de regressão relacionando a produtividade de girassol e os macronutrientes no solo com doses de lodo de esgoto.....	69
13 - Equações de regressão relacionando os teores de nutrientes na folha de girassol com doses crescentes de lodo de esgoto.....	72
14 - Valores médios referentes aos atributos do solo adubado com fertilizante químico ou com doses de lodo de esgoto.....	74
15 - Equações de regressão relacionando os atributos do solo com doses de lodo de esgoto.....	75
16 - Valores médios referentes aos teores de metais pesados no solo adubado com fertilizante químico (AQ) ou com doses de lodo de esgoto.....	78
17 - Teores de metais pesados na folha de girassol em resposta à aplicação de Lodo de esgoto ou adubação química.....	79

18 -	Equações de regressão relacionando os teores de metais pesados no solo com doses de lodo de esgoto.....	82
19 -	Equações de regressão relacionando os teores de metais pesados na planta de girassol com doses de lodo de esgoto.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS

COPASA/MG	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e estatística
USEPA	United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
1 INTRODUÇÃO.....	10
1 REVISÃO DE LITERATURA.....	12
1.1 A cultura do girassol.....	12
1.1.1 Aspectos gerais.....	12
1.1.2 Nutrição mineral do girassol.....	14
1.2 O lodo de esgoto e sua disposição na agricultura.....	17
1.2.1 Efeito da aplicação do lodo de esgoto sobre os atributos do solo.....	17
1.2.2 Efeitos da aplicação do lodo de esgoto sobre a produção das culturas.....	19
1.2.3 Riscos de contaminação do ambiente com o uso agrícola do lodo de esgoto.....	20
1.2.3.1 Nitratos.....	20
1.2.3.3 Organismos patogênicos.....	25
1.2.4 Alternativas para a estabilização do lodo de esgoto.....	26
1.2.4.1 Compostagem.....	26
1.2.4.2 Vermicompostagem.....	27
1.2.4.3 Estabilização química (Caleação).....	29
2 OBJETIVOS.....	31
2.1 Objetivo Geral.....	31
2.2 Objetivos Específicos.....	31
CAPÍTULO 2- PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO MINERAL DE GIRASSOL ADUBADO COM LODO DE ESGOTO ESTABILIZADO POR DIFERENTES PROCESSOS.....	32
RESUMO.....	32
ABSTRACT.....	33
1 INTRODUÇÃO.....	34
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	35

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
3.1	PRODUTIVIDADE E TEORES DE MACRONUTRIENTES NO SOLO E NA PLANTA DE GIRASSOL.....	39
3.2	ATRIBUTOS QUÍMICOS E ÍNDICES DE FERTILIDADE DO SOLO.....	47
3.3	TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO E EM PLANTA DE GIRASSOL.....	52
4	CONCLUSÃO.....	57
CAPÍTULO 3 - PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO MINERAL DE GIRASSOL ADUBADO COM DOSES DE LODO DE ESGOTO		
	RESUMO.....	58
	ABSTRACT.....	59
1	INTRODUÇÃO.....	60
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	62
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.1	PRODUTIVIDADE E TEORES DE NUTRIENTES NO SOLO E NA PLANTA DE GIRASSOL.....	65
3.2	ATRIBUTOS QUÍMICOS E ÍNDICES DE FERTILIDADE DO SOLO.....	73
3.3	TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO E EM PLANTA DE GIRASSOL.....	77
4	CONCLUSÃO.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

CAPÍTULO 1- REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO

A expansão dos centros urbanos tem gerado grande quantidade de esgotos, cuja disposição final inadequada tem deixado os recursos hídricos cada vez mais poluídos e a água potável cada vez mais escassa. Visando à melhoria da qualidade de vida da população e à conservação dos recursos ambientais, diversas estações de tratamento de esgotos têm sido construídas, gerando outro resíduo, denominado lodo de esgoto, o qual também tem se constituído em sério problema quando descartado no meio ambiente.

Atualmente têm-se intensificado os esforços em desenvolver tecnologias e estratégias de uso do lodo de esgoto capazes de tirar proveito do conteúdo de nutrientes e transformar um resíduo problemático em produto útil. A sua utilização na agricultura, além de fornecer nutrientes às plantas e aos microrganismos, promove a melhoria das condições físicas do solo pela adição da matéria orgânica, ao mesmo tempo em que resolve o problema da sua disposição final.

O alto custo dos fertilizantes químicos, conseqüente da alta demanda de energia no processo de produção, geralmente proveniente do uso de petróleo, tem onerado as lavouras que dependem deste insumo. Nesse contexto, o uso do resíduo como adubo orgânico pode aumentar o lucro dos produtores e contribuir com a manutenção da fertilidade do solo, além de preservar os recursos naturais por diminuir a utilização de fertilizantes minerais não renováveis e emissão de gases do efeito estufa.

O efeito do uso do lodo de esgoto na agricultura tem sido demonstrado em alguns estudos. Todavia, em razão da composição química desse resíduo variar com a origem do lodo, assim como com as formas de tratamento do esgoto e com as formas de estabilização do lodo, as informações disponíveis ainda estão aquém das necessidades para fornecer base segura a para utilização do resíduo em substituição à adubação química, principalmente a

nitrogenada, bem como para a determinação de doses que promovam maior eficiência agrônômica, sem causar contaminação ao ambiente.

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 A cultura do girassol

1.1.1 Aspectos gerais

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma eudicotiledônea herbácea, anual, que pertence à família Compositae. A denominação *Helianthus* procede do grego hélios: sol, anthos: flor (ROSSI, 1998). A cultura tem se expandido em vários países, em razão de sua importância como produtora de óleo comestível de alta qualidade e valor econômico (LEITE; PAULA JÚNIOR; VENZON, 2007). É também uma fonte rica de proteína e ainda pode ser usada como planta ornamental, medicinal, em rotação de culturas, adubação verde, pasto apícola, como sementes “in natura” para pássaros, como forrageira para alimentação de bovinos, de caprinos, de cavalos, de muare e, também, como torta e farelo na alimentação de suínos. O óleo, além de seu uso generalizado na alimentação humana, pode ser usado na indústria como substituto ao óleo diesel, na geração de energia (SILVA, 1990).

O crescimento e o desenvolvimento da planta de girassol dividem-se em duas fases: A fase vegetativa, que vai da germinação até a formação inicial do broto floral, e a fase reprodutiva, que vai do aparecimento do botão floral até a maturação dos aquênios. A fase vegetativa é dividida em Ve (emergência) e Vi, que se caracteriza pelo aparecimento de folhas verdadeiras e é definido pelo número de folhas com no mínimo 4 cm de comprimento (V1, V2, V3, V4 e Vn). A fase reprodutiva, por sua vez, está organizada da seguinte forma: R1 – a inflorescência circundada pela bráctea imatura torna-se visível; R2 – refere-se à primeira fase de alongamento, quando o botão floral levanta-se acima da última folha, atingindo de 0,5 a 2,0 cm; R3 – refere-se à segunda fase do alongamento, quando o botão floral está a uma altura maior que 2,0 cm da última folha; R4 e R5 – fases relacionadas a abertura da inflorescência e início da antese, respectivamente; R6 – a antese está completa e as flores liguladas perdem a turgidez; R7 e R8

– fases relacionadas ao enchimento de aquênios e R9 – maturação fisiológica (SCHNEITER; MILLER, 1981).

A cultura apresenta grande adaptabilidade às condições edafoclimáticas, caracterizando-se pela tolerância a baixas temperaturas na fase inicial de desenvolvimento e pela relativa resistência à seca. A produtividade é pouco afetada pela latitude, pela altitude e pelo fotoperíodo, o que facilita a expansão de seu cultivo no Brasil (SOUZA; OLIVEIRA; CASTIGLIONI, 2004). Entretanto, embora considerada planta rústica, resistente ao frio, ao calor e à baixa disponibilidade hídrica do solo, para se alcançar altas produtividades de grãos e de óleo, é necessário que a cultura disponha de temperaturas e de umidade não limitantes ao ótimo desenvolvimento da planta (LEITE; PAULA JÚNIOR; VENZON, 2007).

O girassol se adapta bem às diversas regiões de Minas Gerais; entretanto temperaturas abaixo de 10°C durante a germinação retardam a emergência e induzem a formação de plântulas pequenas, com desenvolvimento lento e menor potencial produtivo. Por outro lado, temperaturas acima de 34°C também prejudicam o desenvolvimento da planta, especialmente se associadas a déficit hídrico. De modo geral, o girassol produz melhor na faixa de 26 a 28°C, em regiões onde ocorrem noites mais frias, em contraste com dias quentes. Nessa condição, além da maior produtividade de aquênios, ocorre também maior produção de óleo. Com relação à densidade de plantio, no Brasil é recomendado o plantio de 40 a 45 mil plantas ha⁻¹, com espaçamento entre linhas de 0,70 a 0,90 m (LEITE; PAULA JÚNIOR; VENZON, 2007).

O girassol apresenta crescimento inicial lento até aos 40 dias após a emergência. Nesse período, a cultura é sensível à competição exercida pelas plantas daninhas, que concorrem por água, luz e nutrientes; além disso, as invasoras podem exercer efeito de alelopatia e hospedar patógenos e pragas. O período crítico de controle das plantas daninhas situa-se entre 10 e 50 dias após a emergência da cultura, devendo a lavoura ser mantida no limpo, caso contrário pode ocorrer redução da produtividade (LEITE; PAULA JÚNIOR; VENZON, 2007; SILVA, 1990).

A colheita do girassol deve ser iniciada quando 80% dos capítulos estiverem secos, com coloração castanho-escuro, cuja umidade nos grãos varia de 14 a 16%. Os grãos colhidos com umidade acima de 16% quebram mais facilmente no processo de limpeza; além disso, no caso de umidade elevada, devem ser considerados os custos e os cuidados adicionais com a secagem do produto. Por outro lado, a demora na colheita resulta também em maior risco de perdas pela ação de pássaros, vento e outros fatores climáticos. Em razão do alto teor de óleo, os grãos de girassol devem ser armazenados com umidade de 8 a 9% (LEITE; PAULA JÚNIOR; VENZON, 2007; ROSSI, 1998).

1.1.2 Nutrição mineral do girassol

O girassol extrai do solo grandes quantidades de nutrientes e essa extração está intimamente ligada e condicionada pelo clima, pelo tipo de solo e pelo manejo da cultura (ROSSI, 1998). Segundo Ungaro (2000), a cultura tolera solos com pH acima de 7,5, no entanto, é extremamente sensível a solos ácidos. Em áreas com pH próximo a 4,0, as sementes sequer germinam e, quando o fazem, as plantas resultantes têm menos de 50 cm de altura e, muitas vezes, nem produzem sementes.

De acordo com Rossi (1998), o N é um dos elementos mais importantes na nutrição do girassol. Seu fornecimento aumenta o conteúdo de proteína, mas pode reduzir a porcentagem de óleo das sementes, se aplicado em excesso. Prado e Leal (2006) observaram que a omissão de N reduziu, significativamente, o desenvolvimento das plantas de girassol, afetando o número de folhas, a altura das plantas, o diâmetro do caule e a área foliar e induziu alterações morfológicas, com sintomas visuais característicos da deficiência de N. Com isso, houve também diminuição significativa na produção de matéria seca das folhas, do caule e das raízes.

O P cumpre um papel muito importante na síntese e no transporte de glicídios e no metabolismo dos lipídios e sua insuficiência pode prejudicar o enchimento das sementes. No começo do desenvolvimento vegetativo, a absorção do P é bastante lenta, crescendo intensamente no período de

formação do capítulo e na floração (ROSSI, 1998). Prado e Leal (2006) observaram que plantas de girassol cultivadas sem a presença de P apresentaram diminuição do número de folhas, da altura da planta, do diâmetro do caule e da área foliar, com conseqüente diminuição da produção de matéria seca de folhas, de caule e de raízes.

Zobiolo *et al.* (2010) avaliaram a absorção de macronutrientes pelo girassol e constataram que o K é o nutriente exigido em maiores quantidades pela cultura, com extração correspondente a 346 kg ha^{-1} de K_2O . Entretanto, como a redistribuição do nutriente ocorre preferencialmente para o capítulo e não para os aquênios, a quantidade exportada do elemento é semelhante à do P e inferior à do N. De acordo com Prado e Leal (2006), o K, após o P e o N, é o elemento que mais influencia as variáveis de crescimento vegetativo do girassol. Esses autores observaram que plantas de girassol cultivadas na ausência de K apresentaram clorose nas folhas baixas, especialmente nas bordas e nas pontas das folhas, no início do desenvolvimento das plantas.

O Ca cumpre um papel importante na planta, equilibrando o N solúvel e proteico, acumulando-se principalmente nas folhas (ROSSI, 1998). Zobiolo *et al.* (2010), avaliando a distribuição dos nutrientes em girassol, verificaram que até o estágio R3, 56 dias após a emergência, aproximadamente 60% da quantidade acumulada de Ca estavam alocadas nas folhas e que a redistribuição do elemento para os aquênios foi muito baixa, resultando em apenas 2% do total acumulado ao final do ciclo. Assim, apesar da extração de Ca do solo pelo girassol ser superior à do Mg e S, esse é o macronutriente que é exportado em menor quantidade pela cultura. Prado e Leal (2006) verificaram que a deficiência de Ca em girassol causa encarquilhamento do limbo foliar, encurtamento dos internódios e, conseqüentemente, redução do crescimento, sendo os sintomas observados primeiramente nas extremidades em crescimento e em folhas mais jovens.

O Mg é parte essencial da clorofila, sendo necessário para a formação dos açúcares, atua ajudando o transporte de P e, conseqüentemente, na formação das gorduras e dos óleos (ROSSI, 1998). Zobiolo *et al.* (2010) observaram que até o estágio R3, de 60-70% do Mg absorvido pela cultura do girassol estavam alocados na folha, que se constituiu na principal fonte de

redistribuição do nutriente, tendo a cultura exportado cerca de 42 kg ha⁻¹ de Mg para uma produção de 3.000 kg ha⁻¹ de grãos. Prado e Leal (2006) verificaram que plantas de girassol que se desenvolveram sob deficiência de Mg apresentaram menor área foliar e menor produção de matéria seca, além disso, apresentaram também amarelecimento da folhas, dando um aspecto de reticulado grosso, com encarquilhamento do limbo foliar.

O S é um elemento importante por ser um componente essencial de todas as proteínas vegetais, ajudando a manter a cor verde intensa das folhas, o vigoroso crescimento da planta e a formação dos grãos (ROSSI, 1998). Zobiolo *et al.* (2010) observaram que, durante o estágio R3, cerca de 60-70% do S estavam alocados na folha; entretanto, diferente do observado para o Mg, durante a fase reprodutiva, a principal fonte de redistribuição de S foi o caule, tendo a cultura exportado cerca de 24 kg ha⁻¹ de S para uma produtividade de 3.000 kg ha⁻¹.

Os micronutrientes cumprem papel bastante significativo na nutrição das plantas, pois são elementos essenciais, embora exigidos em menores quantidades. O Zn influi no crescimento e na formação da clorofila. A carência ocorre geralmente nos solos com características de cerrado. O B melhora o transporte do açúcar para o caule e os grãos, influenciando na produção de sementes. O Fe contribui na formação da clorofila, podendo estar indisponível no solo quando se faz calagem excessiva e o Mn melhora a síntese da clorofila e acelera a maturação das sementes, participando de todo o processo fotossintético (ROSSI, 1998). Zobiolo *et al.* (2011), estudando o acúmulo de micronutrientes em girassol, constataram que a absorção de micronutrientes ocorreu em maior velocidade a partir dos 42 dias após a emergência e que o Fe foi o micronutriente mais absorvido, acumulando maior quantidade tanto nos aquênios como em relação ao total absorvido. De acordo com esses autores, o acúmulo total de Fe, Mn, Zn, B e Cu foi de 38,06, 19,68, 9,20, 8,62 e 4,27 mg por planta, respectivamente.

1.2 O lodo de esgoto e sua disposição na agricultura

O lodo é o resíduo sólido do processo de tratamento de esgoto e, quando processado de modo a permitir o seu manuseio de forma segura na agricultura, é denominado de bio-sólido. Seguindo as tendências do crescimento dos índices de coleta e tratamento de esgotos, ocorrerá um crescimento proporcional de produção de lodo, cuja disposição final tem sido um desafio para a maioria das Estações de Tratamentos de Esgotos (PEDROZA *et al.*, 2003).

A disposição de esgotos na agricultura é uma prática antiga, sendo as informações mais conhecidas originárias da China. No ocidente, sabe-se que, na Prússia, a irrigação com efluentes de esgotos era praticada desde 1560. Na Inglaterra, por volta de 1800, foram desenvolvidos muitos projetos para a utilização agrícola dos efluentes de esgoto, especialmente em razão do combate à epidemia da cólera. A prática de uso do solo como meio de disposição do esgoto ou do lodo tem sido frequente em muitos países. No Brasil, não é difundida a experiência de incorporar resíduos de esgoto, lodo e efluente aos solos, sendo uma das razões para a não utilização desse método de disposição final desses resíduos o fato de ainda serem poucas as cidades dotadas de estações de tratamento de esgotos (ETE`s) (BETTIOL; CAMARGO, 2000).

1.2.1 Efeito da aplicação do lodo de esgoto sobre os atributos do solo

Em solos de regiões tropicais e subtropicais, a matéria orgânica desempenha papel de fundamental importância na fertilidade, por se tratarem de solos altamente intemperizados, cujos minerais, já na escala final do intemperismo, caso da caulinita e gibsitita, possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e pouco potencial de liberação de nutrientes para as plantas. Assim, a matéria orgânica, além de se constituir em um dos principais componentes da CTC, durante o processo de mineralização, libera nutrientes para a nutrição dos vegetais (MELO; MARQUES, 2000).

Nascimento *et al.* (2004) constataram aumento no solo dos teores de N, P, K, Ca e Mg, em função do aumento das doses de lodo de esgoto. Também, Antolin *et al.* (2005), Chiaradia *et al.* (2009) e Chueiri *et al.* (2007) verificaram melhoria da qualidade química pela adição do lodo de esgoto em diversos tipos de solo.

O aumento do carbono orgânico e da capacidade de troca catiônica e a redução do pH do solo foram observados por Antolín *et al.* (2005), em função da aplicação do lodo de esgoto durante 3 anos consecutivos. O decréscimo do pH de solos tratados com lodo de esgoto foi constatado também por Caldeira Júnior *et al.* (2009). Segundo Nascimento *et al.* (2004), o aumento do pH do solo devido à aplicação do lodo de esgoto observado em alguns trabalhos (CHUEIRI *et al.*, 2007; KIDD *et al.*, 2007) é resultado da alcalinidade dos materiais utilizados no processo de eliminação de patógenos e da estabilização do lodo, como a cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)₂).

Behling *et al.* (2009) observaram que os teores de carbono orgânico nas diferentes camadas do solo aumentaram com o aumento das doses de lodo de esgoto. Os teores de carbono orgânico foram mais elevados principalmente na camada mais superficial (0-10 cm), seguido de uma transição abrupta para as camadas de 10-20 e 20-40 e, mais suave, para as camadas de 40-60 e 60-90 cm. Em solo adubado durante 10 anos com lodo de esgoto, Kidd *et al.* (2007) constataram que o teor de carbono orgânico foi maior que os valores encontrados em solos similares da região não tratados com o resíduo.

Dentre os efeitos do lodo de esgoto sobre as propriedades físicas do solo, destacam-se a melhoria no estado de agregação das partículas do solo, com consequente diminuição da densidade e aumento na aeração e retenção de água (MELO; MARQUES, 2000). Joshua *et al.* (1998) observaram que o aumento da dose de biossólido reduziu a taxa de escoamento superficial em três diferentes tipos de solo. Esse resultado foi atribuído ao aumento da infiltração de água pela melhoria da qualidade física do solo.

1.2.2 Efeitos da aplicação do lodo de esgoto sobre a produção das culturas

Diversos estudos têm mostrado os efeitos benéficos da aplicação agrícola do lodo de esgoto sobre a produtividade das culturas como resultado das melhorias da qualidade física, química e biológica do solo (BEHLING *et al.*, 2009; CHIARADIA *et al.*, 2009; PEDROZA *et al.*, 2003).

Behling *et al.* (2009) observaram que, com relação à produtividade, a cultura da soja respondeu linearmente ao aumento das doses de lodo de esgoto. A aplicação de 100 t ha⁻¹ do resíduo acarretou incremento de produtividade superior a 1.224 kg ha⁻¹, comparado à testemunha (dose zero de lodo de esgoto). Pedroza *et al.* (2003) aplicaram doses de 0, 60; 100; 200; 250 e 300 kg ha⁻¹ de N na forma de lodo de esgoto calcado na cultura do algodoeiro e verificaram aumento linear para as variáveis peso do algodão em caroço, peso de pluma, fitomassa da parte aérea, fitomassa total e da relação fitomassa da parte aérea/fitomassa da raiz, além de aumento quadrático das variáveis número de capulho por planta e fitomassa de raiz.

Antolín *et al.* (2005) realizaram experimento no período de 1998 a 2001, para investigar os efeitos do lodo de esgoto sobre a produtividade da cultura da cevada, a fisiologia da planta e algumas propriedades do solo. Os resultados mostraram que a aplicação repetida de lodo de esgoto na cultura da cevada aumentou a produtividade de grãos; as plantas apresentaram ainda maior porcentagem de matéria seca e maiores concentrações de proteínas nas folhas. O efeito residual foi observado apenas no primeiro ano após a aplicação do resíduo.

Com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de lodo de esgoto na nutrição e na produtividade da mamoneira, Chiaradia *et al.* (2009) conduziram experimento em Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Os tratamentos testados constaram de quatro doses de lodo de esgoto: 0; 5; 10 e 20 t ha⁻¹, calculadas para fornecer nitrogênio equivalente a 37,5; 75,0 e 150,0 kg ha⁻¹ e um tratamento com fertilização mineral. A aplicação de lodo de esgoto resultou em incremento significativo na produtividade e em outras características biométricas da mamoneira. A aplicação de 10 t ha⁻¹ de lodo de

esgoto (dose que forneceu a quantidade de nitrogênio exigida pela cultura) resultou num índice de eficiência agrônômica 50% superior à obtida com a adubação mineral. Também, Nascimento *et al.* (2004) constataram aumentos na produtividade de milho e feijão, com o aumento das doses de lodo de esgoto, entretanto os valores foram menores que os observados com a fertilização mineral.

1.2.3 Riscos de contaminação do ambiente com o uso agrícola do lodo de esgoto

1.2.3.1 Nitratos

As concentrações altas de N em biossólidos constituem uma das maiores razões para a utilização agrônômica desse resíduo. Entretanto é essencial entender o destino do nitrogênio em solos tratados com biossólidos, tanto por motivos de nutrição vegetal quanto para manejar o risco ambiental representado pela lixiviação de nitrato (CORREA; WHITE; WEATHERLEY, 2005).

Após a aplicação no solo, as reações de mineralização do N orgânico promovem a liberação de formas inorgânicas de N. Sob condições aeróbias de degradação do material orgânico dos biossólidos, parte significativa do N inorgânico é convertida em nitrato, que, se não for absorvido pelas plantas ou imobilizado na biomassa microbiana, torna-se passível de ser perdido por lixiviação no perfil do solo, com a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas (MOLINA *et al.*, 2006). Dessa forma, a resolução nº 375, de 2006, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, determina que a aplicação máxima anual de lodo de esgoto e produtos derivados não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura, segundo a recomendação agrônômica oficial do estado e o teor de nitrogênio disponível no lodo de esgoto ou produto derivado (BRASIL, 2006).

Molina *et al.* (2006) avaliaram os teores de N no solo e em árvores de eucalipto 55 meses após a aplicação de doses de biossólido no solo. Os resultados permitiram concluir que a aplicação de biossólido em doses

superiores a 20 t ha^{-1} resultou em aumento dos teores de N-total em profundidade no solo, o que foi interpretado como evidência de percolação desse nutriente no perfil do solo, porém esse incremento não implicou em riscos ambientais diferentes dos decorrentes da adubação química. A concentração de N nas folhas não foi influenciada pelo aporte inicial do elemento via resíduo ou fertilizante mineral.

O potencial de lixiviação de N-NO_3^- varia de acordo com o tipo de solo e com a forma de tratamento do lodo. Correa, White e Weatherley (2005) avaliaram o risco de lixiviação de N-NO_3^- em dois tipos de solo (Espodosolo e Latossolo) que receberam doses de biossólidos tratados de cinco diferentes formas. Os resultados mostraram que, para doses iguais de aplicação, o N-NO_3^- acumulou até três vezes mais na camada superficial de 20 cm do Latossolo. Entretanto a maior capacidade de campo do Latossolo compensou as maiores concentrações de N-NO_3^- . Dessa forma, apesar do menor acúmulo de N-NO_3^- , o risco de lixiviação no Espodosolo foi 3 a 4 vezes maior que no Latossolo. A aplicação, no Latossolo, de biossólido fresco ou tratado com irradiação solar apresentou, pelo menos, o dobro do risco da aplicação dos biossólidos compostado, caleado ou seco a calor. A lixiviação do N-NO_3^- ficou limitada a 64 cm de profundidade. Assim, o risco de contaminação das águas subterrâneas, causada por uma única aplicação de biossólido, foi considerado baixo para ambos os solos.

Joshua *et al.* (1998) ressaltaram que a concentração de N-NO_3^- nas enxurradas provenientes de parcelas tratadas com doses de lodo de esgoto foi sempre maior que de parcelas que não receberam o resíduo, entretanto os resultados não mostram correlação com o tempo ou taxa de aplicação do lodo de esgoto. Um movimento de N-NO_3^- no perfil do solo foi observado, mas devido à baixa concentração, esse elemento não representou perigo de contaminação das águas subterrâneas.

Behling *et al.* (2009) avaliaram o acúmulo de N no solo, considerando as doses crescentes de lodo de esgoto aplicadas. Os resultados evidenciaram acúmulo de N-NH_4^+ , em detrimento do acúmulo de N-NO_3^- em camadas inferiores a 20 cm. Esse resultado foi atribuído às condições de precipitações pluviais durante o período de realização do experimento e a

condição de encharcamento da área de estudo. Em solos saturados ocorre acúmulo de $N-NH_4^+$, pois a ausência de oxigênio interrompe o processo de nitrificação. Segundo esses autores, as quantidades de lodo de esgoto a serem aplicadas ao solo devem ser diferentes no período da seca e das águas, mesmo quando se baseiam na necessidade de N da cultura.

1.2.3.2 Metais pesados

O destino final adequado do lodo de esgoto constitui-se em grande desafio e é fator fundamental para o sucesso de um sistema de tratamento de águas residuárias (PEDROZA *et al.*, 2003). Em função da presença de altos níveis de nutrientes e de matéria orgânica, a sua utilização na agricultura tem sido reportada como a forma de disposição final mais apropriada. No entanto, os contaminantes, como metais pesados, patógenos e orgânicos persistentes contidos no lodo de esgoto podem prejudicar as culturas e poluir o solo (STEVENS *et al.*, 2003).

A presença de metais pesados em biossólidos é motivo de preocupação quando do uso agrícola desse resíduo, uma vez que existe a possibilidade de absorção desses elementos pelas plantas (ANJOS; MATIAZZO, 2000). Os metais mais comumente encontrados em biossólidos são: chumbo (Pb), níquel (Ni), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu) e zinco (Zn). As concentrações desses metais dependem de vários fatores, tais como: origem do lodo de esgoto, processo de tratamento do esgoto e processo de tratamento do lodo. Além das variações nas concentrações de metais pesados e da taxa de aplicação de lodo de esgoto, a biodisponibilidade é influenciada pelas propriedades do solo, tais como: pH, potencial de redução, teor de matéria orgânica, tipo de argila e capacidade de troca catiônica (BORGES; COUTINHO, 2004b; NASCIMENTO *et al.*, 2004).

Oliveira *et al.* (2005) avaliaram os teores de metais pesados em dois tipos de solos submetidos, por 5 anos consecutivos, a doses de lodo do esgoto. Os resultados evidenciaram que, apesar do aumento dos teores de metais pesados no solo serem proporcional ao aumento da taxa de aplicação de lodo de esgoto, nenhum dos valores encontrados excedeu os limites

estabelecidos para utilização do lodo de esgoto na agricultura pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (1999) e United States Environmental Protection Agency - USEPA (1995). Esses valores foram superiores no solo com maior teor de argila e matéria orgânica. As concentrações de metais pesados foram superiores na parte aérea das plantas de milho, comparado aos teores nos grãos, mas os valores encontrados não excederam os limites considerados tóxicos para as plantas.

Com o objetivo de avaliar a fitodisponibilidade de metais pesados adicionados ao solo via biossólido, usando milho como planta teste, Anjos e Mattiazzo (2000) instalaram experimento em vasos que receberam doses de biossólido a cada dois meses durante um ano. Os metais pesados Cd, Cr, Mn, Ni e Pb estiveram abaixo dos níveis de determinação do método analítico. Entretanto foi observado o aumento dos teores de Cu e Zn nas plantas, evidenciando a disponibilidade desses metais adicionados via biossólido, apesar dos níveis detectados não serem considerados tóxicos para as culturas.

A movimentação superficial e subsuperficial de nutrientes e metais pesados, em três diferentes tipos de solo que receberam doses elevadas de lodo de esgoto foram analisadas, durante dois anos, por Joshua *et al.* (1998). Esses autores observaram que, na análise das águas que escoaram das parcelas que receberam doses de lodo de esgoto, exceto para Fe, Al e Mn, todos os demais cátions estavam bem abaixo dos níveis máximos permitidos na Austrália. As concentrações desses cátions citados estavam também elevadas nas parcelas que não receberam o resíduo, mostrando, claramente, que a presença desses elementos não estava relacionada à aplicação do biossólido. Foi observada ainda uma movimentação de Zn e Cu em pequenas profundidades, evidenciando a movimentação vertical desses elementos nas parcelas tratadas com biossólido. Apesar da movimentação desses cátions no perfil do solo, as concentrações foram consideradas baixas e não apresentavam potencial de poluição das águas subterrâneas. Não foram encontradas evidências de movimentação vertical de nenhum outro metal nos três tipos de solo.

Partindo do princípio de que o comportamento dos metais pesados em solos e a absorção desses metais pelas plantas são dependentes da natureza do metal, das propriedades físico-químicas do solo e do lodo de esgoto, além do tipo de planta avaliada, Kidd *et al.* (2007) conduziram um experimento em solo que recebeu aplicações de lodo de esgoto durante 10 anos, utilizando três diferentes tipos de plantas indicadoras. Foi observado que as concentrações de Co, Cr, Mn, Ni e Pb nos solos das parcelas tratadas com lodo de esgoto foram similares aos solos que não receberam o resíduo. Entretanto as concentrações de Cu e Zn foram 10 e 2 vezes maior, respectivamente. Apesar do aumento observado, as concentrações de metais pesados ainda estavam abaixo dos limites máximos permitidos para solos agrícolas pela legislação vigente na Espanha. As concentrações de metais pesados nas raízes das plantas que se desenvolveram em solos tratados com lodo de esgoto foram sempre maiores. No entanto, em todos os casos, houve um baixo transporte de metais pesados das raízes para a parte aérea. Esses autores observaram que o risco de lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto é maior que o risco de inserção desses elementos na cadeia alimentar via absorção pelas plantas.

Borges e Coutinho (2004a) realizaram estudo com o objetivo de avaliar a distribuição de metais pesados nas frações: trocável, matéria orgânica, óxidos de ferro e de alumínio (não-cristalinos e cristalinos) e residual em dois solos (Neossolo Quartzarênico Órtico típico - RQ e Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso - LV), considerando o pH e as doses de biossólido aplicadas (0; 10; 20; 40 e 60 t ha⁻¹), bem como relacionar os teores dos metais pesados nas diferentes frações do solo com suas quantidades absorvidas pelas plantas de milho. O estudo do fracionamento dos metais mostrou que a maior parte dos metais encontrava-se nas frações com ligações mais estáveis (ligados a óxidos e residual), tendo as frações, trocável e orgânica, apresentado menor representatividade em relação ao total encontrado. No solo arenoso (RQ), maiores proporções dos metais foram encontradas nas frações mais fitodisponíveis (trocável e orgânica), quando comparado ao solo argiloso (LV). A elevação do pH do solo causou uma redistribuição dos metais da fração trocável para formas menos

fitodisponíveis (orgânica e/ou de óxidos). Verificou-se, ainda, que as frações trocável e orgânica foram as maiores responsáveis pelos teores dos metais extraídos do solo e pelo acumulado na parte aérea do milho.

Nogueira *et al.* (2007) constataram que as concentrações de metais pesados no solo não extrapolaram os limites máximos de adição anual, nem os limites máximos permitidos para solos com a aplicação de lodo de esgoto submetido a diferentes processos de higienização. No entanto, independentemente da adição de lodo ao solo, as concentrações de Pb, em grãos de milho e de Pb e Cr, em grãos de feijão, atingiram valores acima dos limites permitidos para produtos agrícolas. Não foi observada influência dos tipos de lodo de esgoto em relação aos teores de metais pesados, em grãos de milho e feijão.

1.2.3.3 Organismos patogênicos

O lodo de esgoto contém uma grande variedade de micro-organismos. A maior parte deles não possui importância médica ou veterinária, pois são saprófitos e participam nos processos de tratamento biológico. Por outro lado, há uma pequena parte, constituída por vírus, bactérias, fungos, protozoários e helmintos, que é patogênica (SOCCOL; PAULINO, 2000).

De acordo com a contaminação por patógenos, o lodo de esgoto é dividido em classe A e B, resultantes de processos de efetiva e moderada redução de patógenos, respectivamente. A legislação vigente permite a utilização do lodo de esgoto ou produto derivado enquadrados como Classe A em quaisquer culturas, respeitadas as restrições previstas nos artigos 12 e 15 da Resolução 375, de 29 de agosto de 2006 (pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo) (BRASIL, 2006).

Nogueira *et al.* (2007) avaliaram o efeito da adubação com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de higienização sobre os teores de metais pesados e densidade de patógenos no solo. Esses autores constataram que as densidades de coliformes fecais e parasitos no solo

foram extremamente baixas, mesmo com a adição de lodo de esgoto não higienizado.

A experiência mundial tem mostrado que quando os biossólidos são aplicados na agricultura obedecendo às diretrizes fixadas para o seu uso, não são constatados efeitos adversos à saúde ou ao meio ambiente, apesar das diretrizes variarem consideravelmente em países que utilizam esse resíduo na agricultura (ANDREOLI; PEGORINI, 2000; CHIARADIA *et al.*, 2009; JOSHUA *et al.*, 1998).

1.2.4 Alternativas para a estabilização do lodo de esgoto

1.2.4.1 Compostagem

A compostagem pode ser definida como uma bioxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracterizado pela produção de CO₂, água, liberação de substâncias minerais e formação de material orgânico estável (FERNANDES; SOUZA, 2001). Os componentes orgânicos biodegradáveis passam por etapas sucessivas de transformação, sob a ação de diversos grupos de micro-organismos. Como se trata de um processo biológico, os fatores mais importantes que influenciam a degradação da matéria orgânica são a aeração e os nutrientes. A temperatura também é um fator importante, principalmente no que diz respeito ao processo de biodegradação e à eliminação de patógenos, porém é resultado da atividade biológica (FERNANDES, 2000).

No início da compostagem, predominam produtos de fácil decomposição microbiológica e, por isso, a atividade (respiração aeróbia de micro-organismos quimiorganotróficos) é mais intensa, com maior liberação de CO₂ e energia na forma de calor. Ao longo do tempo, observa-se uma redução da variável temperatura, evidenciando que a maior parte das substâncias biodegradáveis já foi esgotada e a atividade microbiana não é mais suficiente para gerar energia e aquecer a pilha de composto. Após o consumo do carbono prontamente disponível, inicia-se a degradação de substâncias mais complexas, como celulose e hemicelulose, tarefa essa

realizada principalmente por fungos, resultando em queda dos valores de CO₂ produzidos, de matéria orgânica e da relação C/N (JAHNEL; MELLONI; CARDOSO, 1999).

Durante o processo de compostagem, ocorre a degradação da matéria orgânica, resultando, dessa forma, num decréscimo dessa variável ao longo do processo. A oxidação da matéria orgânica para CO₂, realizada microbiologicamente, faz com que ocorra um aumento relativo nos teores de nutrientes (JAHNEL; MELLONI; CARDOSO, 1999). Costa *et al.* (2009) constataram aumento nas concentrações dos nutrientes, após o processo de compostagem. Esse fato foi atribuído à perda de dois terços do carbono inicial pela respiração microbiana; assim, ao final do processo, a massa total da leira apresentou-se diminuída, porém a quantidade de nutrientes foi conservada, o que resultou na elevação de suas concentrações.

Jahnel, Melloni e Cardoso (1999) observaram que o composto de resíduos urbanos, no início do processo de maturação, apresentava-se ácido (pH em torno de 5), atingindo valores próximos a 8,5 após 52 dias de incubação. Segundo esses autores, o baixo valor do pH do material no início da compostagem pode ter sido causado pelo acúmulo de ácidos orgânicos existentes. Ao longo do processo de compostagem, esses ácidos são metabolizados, provocando aumento no valor de pH. Dessa forma, o uso agrônomo de composto de lixo, no estado inicial do processo de compostagem pode provocar, além do aquecimento pela respiração microbiana, acidificação localizada e temporária do solo, prejudicando o desenvolvimento radicular e a produção vegetal.

1.2.4.2 Vermicompostagem

Vermicompostagem é o processo de estabilização de compostos orgânicos realizado por minhocas. Algumas espécies podem consumir restos de matéria orgânica muito rapidamente, fragmentando esses compostos em partículas muito pequenas, por meio da passagem pela moela, um órgão que todos os vermes possuem (NDEGWA; THOMPSON, 2001). De acordo com Ndegwa, Thompson e Das (2000), a estabilização dos resíduos é resultado

da ação física/mecânica e bioquímica desses organismos. O processo físico ou mecânico inclui a aeração, a redução do tamanho das partículas do substrato e a mistura dessas partículas. O processo bioquímico consiste na decomposição do substrato no intestino das minhocas.

Segundo Godoy, Medeiros e Santana (2009), poucas espécies de minhocas podem ser manejadas em cativeiro para a produção de vermicomposto, dentre as quais apenas duas são criadas no Brasil: a gigante africana (*Eudrilus eugeniae*) e a vermelha da califórnia (*Eisenia foetida*). A *E. foetida* é uma espécie adequada para ser criada em cativeiro, pois apresenta menor tendência a fugir, facilidade de identificação do clitelo, alta capacidade reprodutiva e boa adaptação a diversos tipos de substratos. Em função desses atributos, essa espécie vem sendo utilizada com muito sucesso na vermicompostagem de diversos lodos de origem industrial e de esgotos domésticos (KHWAIRAKPAM; BHARGAVA, 2009; NAIR; SEKIOZOIC; ANDA, 2006; NDEGWA; THOMPSON, 2001; NDEGWA; THOMPSON; DAS, 2000; RODRÍGUEZ-CANCHÉ *et al.*, 2010).

Durante o processo de vermicompostagem, as moléculas orgânicas são quebradas e os elementos químicos presentes nessas moléculas passam para formas mais fitodisponíveis, melhorando, dessa forma, a qualidade do composto. Khwairakpam e Bhargava (2009) observaram redução na relação carbono:nitrogênio (C:N) e na taxa de carbono orgânico total. Entretanto a vermicompostagem aumentou os teores de potássio, de fósforo e de nitrogênio total, bem como a condutividade elétrica do lodo de esgoto. Esses resultados foram também observados por Gupta e Garg (2008).

Muitos estudos têm demonstrado que a vermicompostagem pode ser utilizada como técnica de tratamento de resíduos, resultando em menores riscos de contaminação por patógenos (KHWAIRAKPAM; BHARGAVA, 2009; NAIR; SEKIOZOIC; ANDA, 2006). Rodríguez-Canché *et al.* (2010) observaram que o processo de vermicompostagem reduziu as concentrações de coliformes fecais, *Salmonella spp.* e ovos de helmintos, sendo, no final do processo, o lodo classificado como classe A (lodo com baixas concentrações

de metais, parasitos e patógenos), de acordo com a resolução vigente no México (Mexican Official Standard NOM-004-SEMARNAT-2002).

Khwairakpam e Bhargava (2009) observaram que o processo de vermicompostagem reduziu os níveis dos metais Mn, Zn, Pb e Cu nesse resíduo. Como não houve lixiviação de metais pela drenagem de água, esse fato foi atribuído ao acúmulo de metais pesados nas minhocas. Segundo Morgam e Morgam (1998) e Vijver *et al.* (2007), as minhocas podem acumular metais pesados em seus tecidos. Resultado diferente foi observado por Gupta e Garg (2008) e Silva *et al.* (2002), os quais observaram que o processo de vermicompostagem aumentou os teores de metais pesados no lodo de esgoto.

1.2.4.3 Estabilização química (Caleação)

Na estabilização química, são adicionados produtos ao lodo que podem inibir a atividade biológica ou oxidar a matéria orgânica. Em função do baixo custo, da simplicidade do processo e da eficiência na eliminação de patógenos, a cal é um dos produtos químicos mais utilizados nesse procedimento. Ela é usada para elevar o pH nos digestores, remover fósforo nos tratamentos avançados de efluentes, condicionar o lodo para o desaguamento mecânico e estabilizar, quimicamente, esse resíduo. O fundamento do processo consiste em adicionar a cal ao lodo até atingir pH 12, ou superior, cujo efeito é a destruição de micro-organismos patogênicos, diminuição do odor gerado pelo lodo e fixação de metais pesados (FERNANDES, 2000).

Algumas características físicas e químicas do lodo são alteradas pela adição da cal. Fisicamente, o lodo pode formar uma capa mais dura e branca, ao ser exposto ao ar livre. Quimicamente, além da fixação de metais pesados, pode haver insolubilização do fósforo e perdas de nitrogênio, por volatilização da amônia (FERNANDES; SOUZA, 2001).

Passamani, Keller e Goncalves (2002) observaram que a utilização da cal virgem em doses superiores a 20% foi eficiente na eliminação de coliformes fecais e ovos de helmintos. Resultado semelhante foi observado

por Chagas (1999). Esse autor constatou que, com a caleação a 50% da massa seca do lodo ocorreu redução de 100% de coliformes totais, coliformes fecais e salmonelas no resíduo. Entretanto efeitos adversos da aplicação do lodo de esgoto caleado foram observados por Chueri *et al.* (2007). Esses autores observaram que a elevação do pH do solo acima da neutralidade, em função da aplicação do resíduo, afetou parâmetros morfológicos e a matéria seca de plantas de trigo. Além disso, reduziu a disponibilidade de manganês para as plantas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto agrônômico e ambiental da utilização agrícola do lodo de esgoto no norte de Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a produtividade do girassol adubado com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de higienização e diferentes doses de aplicação.
- Avaliar os teores de macronutrientes no solo e no tecido foliar do girassol adubado com lodo de esgoto.
- Avaliar os teores de metais pesados no solo e no tecido foliar do girassol adubado com lodo de esgoto.

CAPÍTULO 2- PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO MINERAL DE GIRASSOL ADUBADO COM LODO DE ESGOTO ESTABILIZADO POR DIFERENTES PROCESSOS

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho avaliar os teores de nutrientes e metais pesados no solo e na planta, a produtividade de girassol e os atributos do solo em resposta a adubação com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização. O experimento foi desenvolvido em CAMBISSOLO HÁPLICO, com os tratamentos: testemunha (sem adubação), adubação com lodo de esgoto solarizado, adubação com lodo de esgoto compostado, adubação com lodo de esgoto vermicompostado, adubação com lodo de esgoto caleado e adubação química recomendada para a cultura. Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com 4 repetições. As distintas formas de tratamento do lodo de esgoto não influenciaram a produtividade, entretanto a aplicação de lodo de esgoto, independente do método de estabilização empregado, mostrou-se mais eficiente que a adubação química e que o tratamento testemunha. De modo geral, a adubação com lodo de esgoto caleado proporcionou maiores teores de nutrientes no solo. Os tratamentos com lodo de esgoto compostado e vermicompostado apresentaram maiores teores foliares de nutrientes, exceto para N. O pecíolo do girassol mostrou-se sensível apenas à variação nos teores de N e de P no solo. O lodo de esgoto não influenciou os teores de matéria orgânica, o pH, a SB, a V%, a CTC_(t), a CTC_(T) e os teores de H+Al do solo quando comparado à adubação química e ao tratamento sem adubação, exceto o lodo de esgoto caleado, que aumentou o pH, a SB, a V% e a CTC_(t) do solo. Independente da forma de estabilização, a aplicação de lodo de esgoto não influenciou os teores de Cu, Cr, Cd e Ni do solo, porém aumentou os teores de Zn. Também, a aplicação de lodo de esgoto solarizado e do lodo de esgoto caleado aumentou os teores de Pb no solo. De modo geral, os teores de metais pesados na folha e no pecíolo do girassol não foram influenciados pela aplicação de lodo de esgoto. Considerando-se que a produtividade não variou com as formas de estabilização do lodo de esgoto, recomenda-se a utilização de lodo de esgoto solarizado por ser o processo de estabilização que despence menos tempo e mão de obra.

Palavras-chave: *Helianthus annuus*. Biossólido. Compostagem. Vermicompostagem. Lodo caleado.

CHAPTER 2 - PRODUCTIVITY AND MINERAL NUTRITION OF SUNFLOWER FERTILIZED WITH SEWAGE SLUDGE STABILIZED BY DIFFERENT PROCESSES

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the contents of nutrients and heavy metals in soil and plant, the productivity of sunflower and soil properties in response to fertilization with sewage sludge under different stabilization processes. The experiment was conducted in Haplic Cambisol, with the treatments: control (without fertilization), fertilization with sewage sludge solarized, fertilization with compost sewage sludge, fertilization with sewage sludge vermicomposted, fertilization with limed sewage sludge and chemical fertilizer recommended for culture. It was used a randomized block design with four repetitions. The different forms of treatment of sewage sludge did not affect the productivity; however, the application of sewage sludge, regardless of the stabilization method used it showed to be more effective than chemical fertilizer and the control treatment. Overall, fertilization with compost sewage sludge limed provided higher contents of nutrients in the soil. The treatments with compost sewage sludge and vermicomposted had higher leaf nutrient contents, except for N. The petiole of sunflower was sensitive only to variation in levels of N and P in the soil. The sewage sludge did not affect the organic matter content, pH, SB, V%, $CTC_{(t)}$, $CTC_{(T)}$ and the contents of H + Al when compared to chemical fertilizer and treatment without fertilization, except the limed sewage sludge, which increased the pH, SB, CEC and V% (t) of the soil. Independent of stabilization, the application of sewage sludge did not affect the concentrations of Cu, Cr, Cd and Ni from the soil, but increased levels of Zn. Also, the application of sewage sludge solarized and of the limed sewage sludge increased the content of Pb in soil. In general, the levels of heavy metals in the leaf and petiole of sunflower were not influenced by the application of sewage sludge. Considering that the productivity did not vary with the forms of stabilization of sewage sludge, it is recommended the use of sewage sludge to be solarized for the stabilization process that spends less time and labor.

Keywords: *Helianthus annuus*. Biosolids. Composting. Vermicomposting. Limed sludge.

1 INTRODUÇÃO

O girassol (*Helianthus annuus*), planta originária do sudoeste dos Estados Unidos e norte do Canadá, pertence à família das Asteraceae. Seu cultivo tem se expandido em diversos países, pois, além de ser utilizado na alimentação animal, é constituído de 48-52% de óleo de excelente qualidade para alimentação humana, utilizado também na indústria de conservas e de tintas (ROSSI, 1998). Mais recentemente, com a tentativa de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e controlar as emissões de gases do efeito estufa, o girassol passou a fazer parte da matriz energética, na produção de biocombustível (SILVA; FREITAS, 2008).

A produção agrícola pode conduzir à redução dos níveis de matéria orgânica do solo e ao empobrecimento químico desses. Considerando o alto teor de matéria orgânica, bem como a elevada disponibilidade de nutrientes existentes no lodo de esgoto, sua disposição final em áreas agrícolas tem sido reportada como alternativa para amenizar os problemas advindos da produção agrícola e para recuperação de áreas degradadas (CALDEIRA JÚNIOR *et al.*, 2009; GUEDES *et al.*, 2006). Além do benefício econômico na recuperação química e física do solo, a utilização agrícola do lodo de esgoto é ainda interessante do ponto de vista ecológico, uma vez que reduz os efeitos negativos causados pelas demais alternativas de disposição final do resíduo e, ainda, ajuda a preservar as reservas mundiais de nutrientes (AGGELIDES; LONDRA, 2000; DÜRING; GÄTH, 2002).

Embora apresente diversos benefícios, a utilização agrícola do lodo de esgoto é preocupante, pois o resíduo pode conter metais pesados, orgânicos persistentes e organismos patogênicos, os quais, além de contaminarem o solo e prejudicarem o desenvolvimento das culturas, podem ser absorvidos pelas plantas e inseridos na cadeia alimentar (DÜRING; GÄTH, 2002). Portanto, faz-se necessária a estabilização do lodo de esgoto antes de sua aplicação no solo. Nesse sentido, diversos métodos têm sido utilizados, como, por exemplo, a solarização, a compostagem, a vermicompostagem e o tratamento químico com cal (caleação).

As diferentes formas de estabilização do lodo de esgoto promovem mudanças nas características físicas do material e na biodisponibilidade de nutrientes, podendo alterar os resultados obtidos com a utilização agrícola do resíduo. Costa *et al.* (2009) constataram que o processo de compostagem promove aumentos nos teores de nutrientes do substrato, devido à redução do carbono orgânico pela respiração microbiana. Assim, no final do processo, a quantidade de composto produzido é inferior à quantidade de materiais adicionados, sendo aproximadamente mantidas as quantidades de nutrientes para as plantas. Garg, Gupta e Satya (2006) e Gupta e Garg (2008) avaliaram as alterações físicas e químicas em diversos resíduos submetidos ao processo de vermicompostagem e constataram aumentos nos teores de N, P, K e condutividade elétrica do substrato e redução no pH, carbono orgânico total e relação C:N.

A caleação elimina os patógenos do lodo de esgoto pela elevação do pH e da temperatura do resíduo, além de promover a insolubilização de metais. Entretanto, com a adição de cal ao lodo de esgoto pode haver precipitação do fósforo e perdas de nitrogênio por volatilização da amônia (CARNEIRO; SOTTOMAIOR; ANDREOLI, 2005; FIA; MATOS; AGUIRRE, 2005). Churi *et al.* (2007) constataram que a elevação do pH do solo acima da neutralidade, em função da aplicação do lodo caleado, afetou, negativamente, parâmetros morfológicos e a matéria seca de plantas de trigo. Além disso, reduziu a disponibilidade de manganês para as plantas.

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo avaliar os teores de nutrientes no solo e na planta, e a produtividade de girassol, em resposta à adubação com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no período de julho a novembro de 2010 no Instituto de Ciências agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, localizado em Montes Claros - MG, latitude 16°51'38"S e longitude

44°55'00"W, em CAMBISSOLO HÁPLICO, classificado de acordo com Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997), com as seguintes características químicas e físicas, conforme metodologias preconizadas pela EMBRAPA (1997), na camada de 0-20 cm: pH em água = 5,8; P-Mehlich 1 = 3,5 mg dm⁻³; P-remanescente = 16,7 mg L⁻¹; K = 229 mg dm⁻³; Ca = 3,60 cmol_c dm⁻³; Mg = 1,50 cmol_c dm⁻³; Al = 0,20 cmol_c dm⁻³; H + Al = 3,62 cmol_c dm⁻³; soma de bases = 5,69 cmol_c dm⁻³; CTC efetiva = 5,89 cmol_c dm⁻³; m = 3%; CTC total = 9,31 cmol_c dm⁻³; V = 61%; Zn = 0,8 mg dm⁻³; Cu = 0,8 mg dm⁻³; Pb = 10,1 mg dm⁻³; Cr = 0,0 mg dm⁻³; Cd = 0,0 mg dm⁻³; Ni = 0,0 mg dm⁻³; matéria orgânica = 3,39 dag kg⁻¹; areia grossa = 5,60 dag kg⁻¹; areia fina = 14,40 dag kg⁻¹; silte = 38 dag kg⁻¹ e argila = 42 dag kg⁻¹, e na camada de 20 a 40 cm de profundidade: pH em água = 5,5; P-Mehlich 1 = 1,9 mg dm⁻³; P-remanescente = 14,4 mg L⁻¹; K = 117 mg dm⁻³; Ca = 2,8 cmol_c dm⁻³; Mg = 0,80 cmol_c dm⁻³; Al = 0,76 cmol_c dm⁻³; H + Al = 3,62 cmol_c dm⁻³; soma de bases = 3,90 cmol_c dm⁻³; CTC efetiva = 4,66 cmol_c dm⁻³; m = 16%; CTC total = 7,52 cmol_c dm⁻³; V = 52%; Zn = 0,3 mg dm⁻³; Cu = 0,3 mg dm⁻³; Pb = 10,9 mg dm⁻³; Cr = 0,0 mg dm⁻³; Cd = 0,0 mg dm⁻³; Ni = 0,0 mg dm⁻³; matéria orgânica = 2,50 dag kg⁻¹; areia grossa = 4,30 dag kg⁻¹; areia fina = 21,70 dag kg⁻¹; silte = 36 dag kg⁻¹ e argila = 38 dag kg⁻¹.

Utilizou-se o delineamento estatístico de blocos casualizados, com 6 tratamentos e 4 repetições, sendo um tratamento químico (20 kg ha⁻¹ de N, 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O, no plantio e 40 kg ha⁻¹ de N, 45 dias após emergência), de acordo com as Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG, 1999), utilizando-se como fontes de N, P e K respectivamente, ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, quatro tratamentos com lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas, aplicados com base nos teores de nitrogênio disponível, calculados de acordo com metodologias e fórmulas descritas na Resolução CONAMA 375, de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), assim definidos: solarizado (6,12 t ha⁻¹), compostado (37,27 t ha⁻¹), vermicompostado (19,17 t ha⁻¹) e caleado (50,42 t ha⁻¹), e um tratamento que não recebeu qualquer

forma de adubação. Como planta indicadora, utilizou-se o híbrido simples de girassol Helio 863.

O lodo de esgoto solarizado foi coletado na estação de tratamento de esgoto (ETE) do município de Juramento – MG. A ETE possui linha de tratamento composta de tratamento preliminar e de reator anaeróbio UASB interligado em série a uma lagoa de pós-tratamento do tipo facultativa e tratamento do lodo de esgoto por meio do processo de solarização em leito de secagem. Para a compostagem misturou-se o lodo de esgoto solarizado à poda de grama, cuja espécie predominante era *Paspalum notatum* (grama-batatais), de forma a se obter uma relação C:N de 30:1. Constantemente, foram monitoradas a temperatura e a umidade e, para controle desses fatores, efetuou-se revolvimentos sistemáticos das pilhas de composto.

Para a obtenção do vermicomposto, fez-se um pré-composto de lodo de esgoto, misturado à poda de grama, utilizado após um mês do início do processo de decomposição como substrato para a vermicompostagem com minhocas vermelhas da Califórnia (*Eisenia foetida*). O lodo de esgoto caleado foi obtido pela adição de cal virgem, em quantidade correspondente a 50% da massa seca de lodo de esgoto. Após a mistura, elevou-se a umidade dos materiais a 70%. As características dos materiais contendo lodo de esgoto são apresentadas na TAB. 1 e na TAB. 2.

TABELA 1

Características químicas¹ do lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado utilizados no experimento

Forma de estabilização	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
	-----dag kg ⁻¹ -----					
Solarização	2,71 (60)	0,73 (45)	0,34 (21)	0,65 (40)	0,20 (12)	1,61 (99)
Compostagem	1,45 (60)	0,64 (239)	0,34 (126)	0,71 (265)	0,15 (56)	1,28 (477)
Vermicompostagem	1,39 (60)	0,68 (132)	0,48 (92)	0,49 (94)	0,15 (29)	0,92 (176)
Caleação	0,83 (60)	0,66 (335)	0,53 (267)	10,93 (5.511)	0,23 (116)	1,24 (625)

Fonte: Da autora

Notas: ¹ Metodologias preconizadas por Tedesco *et al.* (1995).

Os valores entre parênteses correspondem às quantidades aplicadas em kg ha⁻¹. Para o N as quantidades aplicadas foram baseadas nos teores de N disponíveis.

TABELA 2

Teores de metais pesados¹ no lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado e nos adubos químicos utilizados no experimento

Lodo de esgoto	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb	Cr
	----- mg kg ⁻¹ -----					
Solarizado	526 (3,21)	80 (0,49)	46,49 (0,28)	1,21 (0,007)	92,68 (0,56)	700 (4,28)
Compostado	403 (15,02)	63 (2,35)	46,49 (1,73)	1,40 (0,05)	117,07 (4,36)	900 (33,54)
Vermicompostado	374 (7,17)	71 (1,36)	43,00 (0,82)	1,21 (0,02)	119,51 (2,29)	850 (16,29)
Caleado	454 (22,89)	71 (3,58)	31,27 (1,58)	2,51 (0,13)	285,37 (14,38)	825 (41,60)
Superfosfato simples	142	16,2	62	6,2	116	333
Ureia	2,5	1,62	-	0,7	8	-
Cloreto de Potássio	2,5	4,62	15	2,4	83	-
CMP ³	2.800	1.500	420	39	300	1.000

Fonte: Da autora

Notas: ¹Metodologias preconizadas por Tedesco *et al.* (1995).

³CMP - Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (BRASIL, 2006).

Os valores entre parênteses correspondem às quantidades de metais aplicadas ao solo em kg ha⁻¹.

As adubações referentes aos tratamentos com lodo de esgoto foram realizadas de uma única vez, no sulco de plantio. As parcelas experimentais constituíram-se de quatro linhas de 3,60 m de comprimentos, espaçadas em 0,80 m, sendo a parcela útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,4 m de cada extremidade. O semeio foi realizado em sulcos, colocando-se três sementes por cova a uma distância de 0,20 m entre plantas. Quinze dias após a emergência, fez-se o desbaste, deixando-se apenas uma planta por cova. Manteve-se a área de cultivo sem a presença de plantas daninhas, por meio de capina manual e fez-se o fornecimento de água à cultura, por meio de irrigação por aspersão.

No início do florescimento do girassol, foram coletadas amostras de folhas e pecíolos do terço superior de 10 plantas, escolhidas aleatoriamente na parcela útil, para análise química dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Cu, Pb, Cr, Cd e Ni (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; TEDESCO *et al.*, 1995).

Quando o girassol apresentava-se na fase (R9), cujos capítulos encontravam-se voltados para baixo, realizou-se a colheita, sendo que, para

o cálculo da produtividade, corrigiu-se a umidade dos grãos para 13%. Após a colheita, coletou-se entre plantas, na linha, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, 8 sub-amostras de solo por parcela para formarem amostras compostas para análises de pH, P, K, Ca, Mg, S de Zn, Cu, Pb, Cr, Cd, Ni, matéria orgânica, pH, soma de bases (SB), CTC efetiva (CTC(t)), CTC potencial (CTC(T)), saturação por bases (V) e H+Al (EMBRAPA, 1997; TEDESCO *et al.*, 1995).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas até 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PRODUTIVIDADE E TEORES DE MACRONUTRIENTES NO SOLO E NA PLANTA DE GIRASSOL

As distintas formas de tratamento do lodo de esgoto não influenciaram a produtividade, entretanto, a aplicação de lodo de esgoto, independente do método de estabilização empregado, mostrou-se mais eficiente que a adubação química e que o tratamento testemunha (TAB. 3). Considerando os teores de P e K disponíveis no lodo de esgoto (TAB. 1) e as doses aplicadas desse resíduo, foram adicionadas ao solo via lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, quantidades respectivas de 45; 239; 132 e 335 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 21; 126; 92 e 267 kg ha⁻¹ de K₂O. Observa-se que, exceto para o lodo de esgoto solarizado, cujo teor de N disponível mostrou-se superior, sendo, portanto, necessária menor dose para atingir o total de N requerido pela cultura, os tratamentos com lodo de esgoto excederam em muito a recomendação de aplicação de tais elementos para a cultura nas condições de solo do experimento (70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O), mesmo considerando uma taxa de mineralização de P orgânico de 60%, citada pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG, 1999). A maior quantidade aplicada de P, K, Ca, Mg e S via lodo de esgoto (TAB.1) e micronutrientes, como o boro, além dos benefícios para o solo da matéria orgânica contida no resíduo (TRANNIN; SIQUEIRA;

MOREIRA, 2008), podem justificar a maior produtividade quando comparada à adubação química.

TABELA 3

Produtividade e teores de nutrientes no solo, em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto

Variáveis	Prof. (cm)	TRATAMENTOS						CV (%)
		TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ	
Prod. (t ha ⁻¹)	-	1,37 b	3,52 a	2,87 a	2,66a	3,05a	2,21b	27,06
P (mg dm ⁻³)	0-20	1,65 b	2,3 b	5,5 b	4,92 b	11,78 a	3,2 b	45,10
	20-40	0,90 b	1,15 b	1,63 b	1,65 b	2,63 a	1,47 b	38,82
K (mg dm ⁻³)	0-20	162,50 a	145,00 a	148,75 a	152,50 a	148,00 a	135,75 a	22,39
	20-40	82,50 a	72,75 a	60,75 a	79,00 a	83,75 a	70,00 a	29,78
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0-20	3,82 b	4,53 b	4,42 b	4,30 b	10,25 a	3,45 b	17,33
	20-40	2,00 b	3,40 b	2,00 b	2,30 b	5,90 a	1,90 b	47,42
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0-20	0,70 a	0,70 a	0,73 a	0,65 a	0,45 b	0,68 a	17,39
	20-40	0,33 a	0,38 a	0,28 a	0,28 a	0,38 a	0,33 a	27,90
S (mg dm ⁻³)	0-20	16,85 b	30,08 b	34,88 b	25,85 b	66,10 a	40,28 b	51,55
	20-40	8,48 b	28,65 b	21,73 b	5,43 b	65,33 a	12,58 b	57,51

Fonte: Da autora

Notas: TE – testemunha; LS – lodo de esgoto solarizado; LCO – lodo de esgoto compostado; LV – lodo de esgoto vermicompostado; LCA – lodo de esgoto caleado; AQ – adubação química; Prof. – profundidade, Prod - produtividade

Para cada variável, médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Ressalta-se, ainda, que a produtividade obtida no tratamento testemunha (1,37 t ha⁻¹) foi superior à produtividade média nacional no ano de 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011), que foi de 1,14 t ha⁻¹. Os tratamentos químico, lodo solarizado, lodo compostado, lodo vermicompostado e lodo caleado apresentaram produtividades respectivas superiores de 194; 309; 252; 233 e 268%, comparadas à produtividade média nacional, evidenciando o potencial de utilização agrícola do lodo de esgoto na cultura do girassol. Entretanto, diferente do constatado neste experimento, Lobo e Grassi Filho (2007) observaram que, apesar de o lodo de esgoto promover aumentos na produtividade do girassol quando aplicado em doses maiores, em quantidade suficiente para suprir a demanda de N da cultura, não ocorre maior produtividade, comparado à adubação química e ao tratamento sem adubação. Também, Nogueira *et al.* (2006), em solo semelhante ao utilizado

no presente experimento, não constataram aumentos de produtividade na cultura do milho e feijão consorciados, adubados com lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas, em relação à adubação química.

As formas de estabilização praticamente não alteraram a disponibilidade de P no lodo de esgoto (TAB. 1). Todavia, como resultado da variação acentuada na taxa de disponibilidade de N, as doses de lodo de esgoto variaram consideravelmente entre os tratamentos, o que resultou em maior aporte de P ao solo no tratamento com lodo de esgoto caleado e, conseqüentemente, maiores teores do elemento nesse tratamento na camada de 0-40 cm de profundidade (TAB. 3). Para os demais tratamentos, apesar de os teores de P aplicados no solo terem sido distintos, não houve diferenças estatísticas, o que pode ser atribuído à maior produtividade nas parcelas que receberam adubações com lodo de esgoto. Contrário ao constatado nesse experimento, Nogueira *et al.* (2006) observaram, no cultivo de milho e feijão consorciados, maior teor de P no tratamento que recebeu adubação química, comparado aos que receberam lodo de esgoto estabilizado. No entanto, as diferenças de resultados entre esses experimentos podem estar relacionadas à quantidade de P aplicada nos solos, que variaram principalmente em razão da necessidade de P das respectivas culturas.

Com base nos teores de K nos materiais utilizados, foram aplicadas, por meio dos tratamentos testemunha, lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado, caleado e adubação química, quantidades respectivas de 0; 21; 126; 92; 267 e 30 kg ha⁻¹ de K₂O. Apesar das diferenças nas quantidades aplicadas, os teores de K no solo, após o cultivo do girassol, foram semelhantes (TAB. 3). Além da maior exportação do nutriente nos tratamentos que receberam lodo de esgoto, em razão da maior produtividade, as altas concentrações de cátions fornecidas por esses tratamentos podem ter promovido a lixiviação do nutriente pelo deslocamento do elemento da micela coloidal do solo. Também a maior disponibilidade de K no solo aumenta os índices de lixiviação do nutriente, principalmente considerando o constante fornecimento de água à cultura (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008).

Diversos trabalhos consideram o lodo de esgoto como sendo resíduo pobre em K, uma vez que é um nutriente encontrado predominantemente na forma iônica, tendendo a permanecer em solução durante o processo de tratamento do esgoto, sendo a complementação química com esse elemento constantemente recomendada (BUENO *et al.*, 2011; GUEDES *et al.*, 2006; SIMONETE *et al.*, 2003). Todavia, neste experimento, o K não poderia ser considerado elemento limitante da produtividade, pois as quantidades adicionadas ao solo, com os tratamentos lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado foram, respectivamente: 0,7; 4,2; 3,1 e 8,9 vezes a recomendada. No tratamento com lodo de esgoto solarizado, cuja quantidade aplicada foi inferior à recomendada, não foram verificados sintomas visuais de deficiência, mas vale ressaltar os elevados teores iniciais de K no solo, variando de 229 a 117 mg dm⁻³ na profundidade de 0 a 40 cm.

O nutriente que sofreu maior variação em seus teores pelas diferentes formas de estabilização do lodo de esgoto foi o Ca. A concentração desse elemento no lodo de esgoto caleado apresentou-se no mínimo 15 vezes superior ao observado nas demais formas de estabilização (TAB. 1). Assim, a aplicação de lodo de esgoto caleado proporcionou maiores teores de Ca no solo, na profundidade de 0-40 cm. Entre os demais tratamentos, não foram constatadas diferenças estatísticas. O elevado teor de Ca no lodo de esgoto caleado e, conseqüentemente, seu aumento no solo em razão da aplicação do resíduo, sendo é resultado da adição de grandes quantidades de CaO no processo de caleação e foi também observado por Chueri *et al.* (2007) e Guedes *et al.* (2006). Os resultados corroboram com os de Nogueira *et al.* (2006), os quais avaliaram os teores de Ca em solos tratados com lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas e verificaram o mesmo efeito quando da aplicação do lodo de esgoto caleado.

Para todas as formas de lodo de esgoto aplicadas, o macronutriente que se encontrava em menores concentrações era o Mg. Assim, como para os demais nutrientes avaliados, no tratamento com lodo de esgoto caleado, foram aplicadas as maiores doses desse elemento. Entretanto, nessa forma de adubação, foram constatados os menores teores do nutriente no solo na

camada de 0-20 cm. Não foram observadas diferenças estatísticas para essa variável entre os tratamentos na camada de 20-40 cm de profundidade (TAB. 3). Aplicando doses de até 10 t ha^{-1} de lodo de esgoto alcalinizado, Chueri *et al.* (2007) não constataram efeitos sobre os teores de Mg no solo.

Os teores de S variaram consideravelmente no lodo de esgoto em razão das formas de estabilização. Observa-se, na TAB. 1, que os teores constatados no lodo de esgoto compostado, vermicompostado e caleado são, respectivamente 79; 57 e 77% do teor de S no lodo de esgoto solarizado, apesar de diversos trabalhos constatarem aumentos de nutrientes no vermicomposto, em relação aos teores iniciais, principalmente em razão da concentração de nutrientes pela perda de carbono orgânico durante a respiração microbiana (DORES-SILVA; LANDGRAF; REZENDE, 2011; GARG; GUPTA; SATYA, 2006; GUPTA; GARG, 2008). Esses fatos sugerem que, com o avanço do processo de decomposição, pode ter ocorrido redução do S por bactérias, com consequente perda do elemento para a atmosfera, o que é bastante observado em solos alagados ou em sítios anaeróbios de solos bem drenados (ALVAREZ *et al.*, 2007).

O aporte de S ao solo, nos tratamentos lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado foi, respectivamente, 99, 477, 176 e 625 kg ha^{-1} . Como pode ser observado, mesmo não sendo maiores os teores de S no lodo de esgoto caleado, em razão das doses aplicadas com essa forma de estabilização, adicionou-se as maiores quantidades de S ao solo, o que resultou em maiores teores do elemento no solo, em relação aos demais tratamentos, na profundidade de 0-40 cm (TAB. 3). Considerando que o resíduo foi incorporado no sulco de plantio (10 cm de profundidade), a influência do tratamento lodo de esgoto caleado nos teores de S, na profundidade de 20-40 cm, pode ter sido favorecida pela presença de grandes quantidades de Ca, cujo resultado da ligação com S é a formação de pares iônicos neutros, com grande mobilidade no solo (ALVAREZ *et al.*, 1999a).

Plantas de girassol adubadas com lodo de esgoto caleado apresentaram teores foliares de N superiores aos demais tratamentos (TAB. 4), atingindo valores acima do considerado adequado, segundo Malavolta,

Vitti e Oliveira (1997). O mesmo comportamento foi constatado no pecíolo do girassol, apesar de a quantidade de N disponível aplicada ter sido igual em todos os tratamentos. Considerando o poder de correção da acidez do solo do lodo de esgoto caleado, uma hipótese plausível para explicação dos resultados obtidos é a aceleração da taxa de nitrificação do N pela elevação do pH do solo, nesse tratamento (SILVA; VALE; GUILHERME, 1994). Não foram observadas diferenças estatísticas nos teores foliares de N entre os tratamentos testemunha, lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e tratamento químico. No entanto, quando aplicado o lodo de esgoto solarizado, os teores de nitrogênio na folha atingiram níveis adequados, enquanto nos tratamentos testemunha, químico, lodo compostado e vermicompostado, os teores de N, na folha, ficaram aquém dos níveis ideais (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Lavado (2006) não constatou diferença nos teores de N na parte aérea de girassol adubado com lodo de esgoto em doses de até 14 t ha^{-1} , comparado ao tratamento sem adubação.

Quando adubado com lodo de esgoto compostado, vermicompostado ou caleado, os teores de P na folha do girassol foram estatisticamente maiores que os teores observados nos demais tratamentos. Todavia, em nenhum dos tratamentos aplicados, os teores de P na folha atingiram níveis adequados (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Considerando a boa disponibilidade de P no solo no tratamento com lodo de esgoto caleado, o teor observado na folha ficou aquém do potencialmente possível, uma vez que o nível nutricional adequado não foi atingido. Provavelmente, o elevado teor de Ca no solo, nesse tratamento, promoveu a precipitação do P, sendo que a determinação desse último utilizando o extrator Mehlich-1, pode ter superestimado os teores disponíveis desse elemento, em razão da possibilidade de sua precipitação com Ca (FIA; MATOS; AGUIRRE, 2005; NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Com relação aos teores de P no pecíolo, plantas de girassol adubadas com lodo de esgoto compostado e vermicompostado apresentaram valores superiores aos demais.

TABELA 4

Teores de nutrientes na folha e no pecíolo de girassol, em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas

Nutriente	TRATAMENTOS						CV	Níveis Adequado ¹
	TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ		
-----dag kg ⁻¹ -----							%	dag kg ⁻¹
Folha								
N	3,06 b	3,38 b	3,25 b	3,10 b	4,07 a	3,10 b	8,13	3,3 – 3,5
P	0,18 b	0,19 b	0,23 a	0,23 a	0,26 a	0,21 b	10,27	0,4 – 0,7
K	2,27 a	2,15 a	2,32 a	2,36 a	2,49 a	2,32 a	14,56	2,0 – 2,4
Ca	1,37 b	1,48 b	1,65 a	1,78 a	1,40 b	1,79 a	12,53	1,7 – 2,2
Mg	0,24 b	0,26 b	0,28 a	0,28 a	0,25 b	0,28 a	7,47	0,9 – 1,1
S	0,23 a	0,24 a	0,20 a	0,22 a	0,25 a	0,22 a	21,66	0,5 – 0,7
Pecíolo								
N	0,71 b	0,73 b	0,65 b	0,64 b	1,12 a	0,66 b	10,43	-
P	0,11 b	0,11 b	0,17 a	0,18 a	0,14 b	0,12 b	17,52	-
K	3,44 a	3,23 a	2,93 a	2,95 a	3,30 a	3,32 a	11,26	-
Ca	1,18 a	1,06 a	1,23 a	1,31 a	1,19 a	1,17 a	9,91	-
Mg	0,24 a	0,24 a	0,24 a	0,25 a	0,24 a	0,23 a	9,83	-
S	0,14 a	0,14 a	0,15 a	0,15 a	0,16 a	0,14 a	6,87	-

Fonte: Da autora

Notas: TE – testemunha; LS – lodo de esgoto solarizado; LCO – lodo de esgoto compostado; LV – lodo de esgoto vermicompostado; LCA – lodo de esgoto caleado; AQ – adubação química.

¹Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Para cada nutriente, médias seguidas de mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott.

Os teores de K na folha do girassol não variaram em razão dos tratamentos aplicados e, com exceção do tratamento com lodo de esgoto caleado, cujo teor de K estava acima do considerado ideal, todos os tratamentos apresentaram teores de K na folha em níveis nutricionais adequados. Também não foram constatadas diferenças nos teores de K no pecíolo do girassol. Esses resultados podem ser atribuídos aos elevados teores de K no solo, considerando que mesmo no tratamento testemunha, os teores de K no solo foram classificados como muito bom, de acordo com Alvarez *et al.* (1999b).

Embora quando aplicado lodo de esgoto caleado o teor de Ca no solo tenha sido muito superior, esse tratamento, bem como o tratamento com lodo de esgoto solarizado e a testemunha apresentaram teores foliares de Ca inferiores aos tratamentos químico, lodo de esgoto compostado e lodo de esgoto vermicompostado (TAB. 4), o que reforça a hipótese de precipitação

do Ca com o P no tratamento com lodo de esgoto caleado, como já comentado anteriormente. Apesar do lodo de esgoto compostado ser um dos tratamentos que apresentou, estatisticamente, maiores teores de Ca na folha, apenas no tratamento químico e no tratamento com lodo de esgoto vermicompostado, os níveis de Ca na folha foram considerados nutricionalmente adequados, de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Com relação aos teores de Ca no pecíolo, observa-se que esse órgão não é sensível à variação nos teores desse elemento no solo, uma vez que não houve diferenciação para essa variável entre os tratamentos.

Os teores de Mg na folha do girassol foram influenciados pelos tratamentos, sendo constatados maiores teores quando aplicado lodo de esgoto compostado, vermicompostado e adubação química. O mesmo não foi observado para o pecíolo, onde, independente do tratamento, os teores de Mg foram iguais. Apesar de ter havido diferenciação entre os tratamentos, os níveis foliares de Mg estavam abaixo do nutricionalmente adequado (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Considerando a quantidade de Mg aplicada no solo em cada tratamento, esses resultados podem ser atribuídos à maior disponibilidade desse elemento para as plantas, exceto para o tratamento com lodo de esgoto caleado, em que os teores foliares de Mg não condizem com as quantidades aplicadas no solo. Todavia, de acordo com Vitti, Lima e Cicarone (2006), o desequilíbrio entre Ca e Mg no solo e elevados teores de K podem acentuar a deficiência de Mg, além da baixa proporção de Mg na CTC (<6%) nesse tratamento.

Os maiores teores estatísticos de S no solo, no tratamento lodo de esgoto caleado, não resultaram em aumentos dos teores do elemento na folha do girassol (TAB. 4), provavelmente devido aos altos teores de S no solo, cuja classificação de disponibilidade foi muito boa (ALVAREZ *et al.*, 1999b), até mesmo no tratamento testemunha. Apesar disso, os teores foliares de S ficaram aquém do considerado nutricionalmente adequado para a cultura (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Assim como observado na folha, os teores de S no pecíolo do girassol não foram influenciados pelos tratamentos.

Considerando-se que a produtividade não variou com as formas de estabilização do lodo de esgoto, recomenda-se a utilização de lodo de esgoto solarizado, por ser o processo de estabilização que despende menos tempo e mão de obra.

3.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS E ÍNDICES DE FERTILIDADE DO SOLO

Apesar do lodo de esgoto ser rico em matéria orgânica, a sua aplicação não influenciou os teores dessa variável no solo para nenhum dos tratamentos (TAB. 5). De acordo com Bayer e Mielniczuc (2008), as temperaturas mais elevadas das regiões tropicais resultam em elevações das taxas dos processos químicos e bioquímicos, com consequente aceleração no processo de mineralização da matéria orgânica, situação que se amplia em solos submetidos ao uso agrícola. Assim, efeitos da aplicação do lodo de esgoto sobre os teores de matéria orgânica do solo têm sido observados com aplicações sucessivas do resíduo, conforme relatado por Bueno *et al.* (2011) após 7 anos de aplicação de lodo de esgoto ao solo. Melo *et al.* (1994) constataram efeitos significativos, porém temporários, sobre os teores de matéria orgânica do solo, quando aplicadas doses de até 32 t ha⁻¹ de lodo de esgoto. Segundo esses autores, o tempo de residência do carbono orgânico adicionado ao solo via lodo de esgoto é muito curto. Por outro lado, Barbosa *et al.* (2007), mesmo após o segundo cultivo de milho, constataram efeito residual da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores de carbono do solo em doses de até 36 t ha⁻¹. Aumentos nos teores de carbono orgânico no solo, em razão da aplicação de lodo de esgoto, foram também observados por Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008), Galdos, Maria e Camargo (2004) e Nascimento *et al.* (2004).

TABELA 5
Atributos do solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto tratado de diferentes formas

Atributo	Prof. (cm)	TRATAMENTOS						CV (%)
		TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ	
MO (dag kg ⁻¹)	0-20 ^{ns}	2,30	2,50	2,50	2,50	2,60	2,60	10,24
	20-40 ^{ns}	1,65	1,68	1,65	1,58	1,58	1,73	14,29
pH	0-20	6,48 b	6,18 b	6,45 b	6,40 b	7,85 a	5,85 b	4,81
	20-40	5,97 b	5,92 b	5,55 b	5,82 b	6,93 a	5,55 b	7,60
SB (cmol _c dm ⁻³)	0-20	4,94 b	5,60 b	5,53 b	5,34 b	11,08 a	4,47 b	15,81
	20-40	2,54 b	3,99 b	2,38 b	2,80 b	6,44 a	2,41 b	22,50
CTC _(f) (cmol _c dm ⁻³)	0-20	4,94 b	5,67 b	5,53 b	5,34 b	11,08 a	4,60 b	15,37
	20-40 ^{ns}	3,66	4,81	3,46	3,78	6,44	3,91	31,86
CTC _(T) (cmol _c dm ⁻³)	0-20 ^{ns}	7,09	7,62	7,93	7,81	11,91	7,57	16,72
	20-40 ^{ns}	6,34	7,87	6,92	6,27	8,63	6,33	31,86
v (%)	0-20	70,25 b	75,75 b	69,75 b	68,00 b	94,25 a	60,00 b	14,20
	20-40	40,20 b	53,00 b	34,80 b	44,20 b	75,20 a	40,50 b	28,33
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	0-20 ^{ns}	2,14	2,02	2,40	2,48	0,82	3,10	48,78
	20-40 ^{ns}	3,80	3,88	4,54	3,47	2,19	3,92	40,75

Fonte: Da autora

Notas: TE – testemunha; LS – lodo de esgoto solarizado; LCO – lodo de esgoto compostado; LV – lodo de esgoto vermicompostado; LCA – lodo de esgoto caledado; AQ – adubação química. ^{ns} – Não significativo.

Para cada nutriente, médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

Conforme esperado, em razão da adição de cal virgem, a aplicação de lodo de esgoto caledado promoveu aumento significativo no pH do solo, resultando estatisticamente em valores superiores aos demais tratamentos, atingindo, inclusive, classificação agrônômica muito alta, de acordo com Alvarez *et al.* (1999b). O aumento no pH do solo pela adição de lodo de esgoto alcalinizado foi também observado por Chueiri *et al.* (2007), Kidd *et al.* (2007) e Oliveira *et al.* (2002). Marin *et al.* (2010) analisaram as curvas de pH de três tipos de solo para determinação das taxas de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado pelo processo de estabilização alcalina, com adição de cal na proporção de 50% de sólidos totais e constataram que, para Cambissolo Háplico, o valor limite da taxa de aplicação para manter o pH do solo em faixa adequada para desenvolvimento das culturas, foi de 31 t ha⁻¹.

Considerando os teores de N disponível no lodo caleado e as exigências de N da cultura, no presente experimento, foram aplicadas 50,42 t ha⁻¹ de lodo de esgoto caleado. Segundo Fia, Matos e Aguirre (2005), em razão das alterações que proporciona no pH do solo, recomenda-se a utilização do lodo de esgoto caleado como corretivo de acidez do solo, e não como adubo orgânico.

O valor do pH do solo antes da instalação do experimento era de 5,8, classificado agronomicamente como bom (ALVAREZ *et al.*, 1999b) e, após o cultivo, nos tratamentos testemunha, lodo de esgoto solarizado, lodo de esgoto compostado e lodo de esgoto vermicompostado, ocorreu um ligeiro aumento atingindo valores médios de 6,4, cuja classificação agrônômica é alto. Esses resultados contradizem os observados na literatura, em que a aplicação de lodo de esgoto não alcalinizado promove a redução do pH do solo (ANTOLÍN *et al.*, 2005; BUENO *et al.*, 2011; GALDOS; MARIA; CAMARGO, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2004; SIMONETE *et al.*, 2003). Entretanto, no presente experimento utilizou-se irrigação com água calcária (pH: 7,6; condutividade elétrica: 468 us/cm e dureza total em CaCO₃: 222 mg/L), cujas elevadas concentrações de CO₃²⁻ e HCO₃⁻ promovem aumentos no pH do solo. O aumento do pH em parcelas que não receberam qualquer forma de adubação em experimentos irrigados na região foi também observado por Nogueira *et al.* (2006). No tratamento químico, observa-se que, apesar da irrigação com água calcária, o pH manteve-se nos níveis iniciais, o que pode ser atribuído à acidificação provocada pela adubação nitrogenada (BOUMAN *et al.*, 1995; PRIMAVESI *et al.*, 2005; RODRIGUEZ; GODEAS; LAVADO, 2008).

Tendo como base a composição química dos materiais contendo lodo de esgoto (TAB. 1) e as doses aplicadas, foram adicionadas ao solo, com os tratamentos testemunha, lodo de esgoto solarizado, lodo de esgoto compostado, lodo de esgoto vermicompostado e lodo de esgoto caleado quantidades respectivas de 0; 17; 104; 76 e 222 kg ha⁻¹ de K, 40; 265; 94 e 5.511 kg ha⁻¹ de Ca, e 12; 56; 29 e 116 kg ha⁻¹ de Mg. Considerando que a SB e a V% são diretamente relacionadas à presença desses elementos no solo, observa-se que a maior adição de Ca, Mg e K no tratamento com lodo

de esgoto caleado resultou em maiores valores de SB e V%, nas duas profundidades avaliadas (TAB. 5). Não foram constatadas diferenças estatísticas entre os demais tratamentos. O aumento da SB e da V%, em razão da aplicação de lodo de esgoto caleado, foi também observado por Guedes *et al.* (2006) e Nogueira *et al.* (2006) e é resultado da grande quantidade de Ca adicionada ao lodo de esgoto durante o processo de caleação.

Como relatado anteriormente, a adição de CaO no processo de estabilização do lodo de esgoto resulta em um material com elevado poder de correção da acidez e a aplicação do lodo de esgoto caleado resultou em aumentos no pH do solo. Com o aumento do pH, ocorre a precipitação do alumínio e neutralização do H^+ , resultando em maior exposição das cargas negativas do solo. Assim, a $CTC_{(t)}$ foi maior, com a aplicação de lodo de esgoto caleado, quando comparada aos outros tratamentos na camada de 0-20 cm (TAB. 5). Entretanto, de 20-40 cm, não foram constatadas diferenças estatísticas entre os tratamentos. Nogueira *et al.* (2006), trabalhando em Cambissolo Háplico e com lodo de esgoto tratado de diferentes formas, constataram que solos que receberam lodo de esgoto caleado apresentam maior $CTC(t)$.

Contrário ao observado para a $CTC(t)$, não foram verificadas diferenças estatísticas entre os tratamentos nas profundidades avaliadas com relação à $CTC(T)$. Considerando que a $CTC(T)$ reflete a capacidade do solo em reter cátions a pH 7 e que, no tratamento com lodo de esgoto caleado, o solo já se encontrava nessa faixa de pH, praticamente não houve aumento dessa variável, quando comparada à $CTC(t)$, enquanto, nos demais tratamentos, cujo pH médio era de 6,3, a elevação do pH a 7, para a determinação da $CTC(T)$, promoveu liberação das cargas negativas do solo ocupadas pelo H^+ e Al^{3+} , o que expôs uma quantidade de cargas negativas que atingiu valores estatisticamente semelhantes ao observado no tratamento com lodo de esgoto caleado. Além de, na avaliação da $CTC(T)$, os tratamentos encontrarem-se em pH equivalentes, os teores de matéria orgânica não foram alterados e os tratamentos não têm influência sobre a mineralogia do solo, que, sendo os principais responsáveis pelo

desenvolvimento das cargas negativas do solo, poderiam alterar a CTC(T) entre os tratamentos (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Por outro lado, quando considerada a classificação agronômica proposta por Alvarez *et al.* (1999b), a aplicação de lodo de esgoto caçado resultou em valores de CTC(T), nas duas camadas avaliadas, classificados como bons (8,61-15,00 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), enquanto nos demais tratamentos os valores de CTC(T) foram classificados como médios (4,31-8,61 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Nogueira *et al.* (2006) verificaram que a aplicação de lodo de esgoto caçado promove aumentos na CTC(T), quando comparados a outras formas de estabilização do lodo.

À exemplo do observado para CTC(T), não foram constatadas diferenças estatísticas entre os tratamentos para os teores de H+Al no solo (TAB. 5). Entretanto, com base em Alvarez *et al.* (1999b), ocorreram alterações na classificação agronômica da variável com os tratamentos aplicados. No tratamento com lodo de esgoto caçado, na profundidade de 0-20 cm, os teores são classificados como muito baixos ($< 1,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$), nos demais tratamentos são classificados como baixos (1,01-2,50 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e médios (2,51-5,00 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Resultado semelhante foi observado na camada de 20-40, onde o teor com a aplicação de lodo de esgoto caçado foi classificado como baixo e nos demais tratamentos, como médio. Esses resultados refletem a capacidade de correção da acidez do solo pelo lodo de esgoto caçado. Guedes *et al.* (2006) avaliaram o efeito da aplicação de doses de até 160 t ha^{-1} de lodo de esgoto caçado e observaram redução nos teores de H+Al, com o aumento da dose do resíduo.

3.3 TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO E EM PLANTA DE GIRASSOL

Os metais pesados determinados no solo foram: o Zn, o Cu, o Pb e o Cr (TAB. 6). Apesar de presentes no lodo de esgoto e nos adubos químicos (TAB. 2), os teores de Cd e Ni no solo estiveram abaixo dos níveis de detecção pelo método analítico utilizado. Além disso, para nenhum dos metais observados no solo, os teores estiveram acima do considerado seguro de acordo com a UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 1999) e as quantidades aplicadas não ultrapassaram a carga acumulada teórica permitida pela resolução CONAMA nº 375, de agosto de 2006 (BRASIL, 2006).

TABELA 6
Teores de metais no solo em resposta à aplicação de fertilizante mineral e Lodo de esgoto tratado de diferentes formas

Metal	Prof. cm	TRATAMENTOS						CV %	Limite ¹ mg dm ⁻³
		TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ		
Zn	0-20	0,83 b	2,40 a	3,77 a	3,50 a	4,02 a	0,78 b	43,79	2.800
	20-40 ^{ns}	0,35	0,83	0,92	0,93	1,25	0,45	63,73	
Cu	0-20 ^{ns}	0,47	0,60	0,55	0,55	0,55	0,45	20,29	1.500
	20-40 ^{ns}	0,33	0,33	0,35	0,38	0,32	0,35	20,23	
Pb	0-20	9,00 b	11,23 a	8,08 b	7,33 b	12,68 a	9,73 b	18,53	300
	20-40 ^{ns}	9,40	9,30	9,20	9,20	8,60	7,70	25,46	
Cr	0-20 ^{ns}	4,23	8,38	10,7	7,95	11,15	6,55	64,85	-
	20-40 ^{ns}	4,67	3,28	6,55	4,22	9,30	9,33	66,79	

Fonte: Da autora

Notas: TE – testemunha; LS – lodo de esgoto solarizado; LCO – lodo de esgoto compostado; LV – lodo de esgoto vermicompostado; LCA – lodo de esgoto caleado; AQ – adubação Química; ^{ns} - não significativo.

¹Adaptado de USEPA (1999), considerando a densidade do solo igual a 1 g cm⁻³ e 20 cm de profundidade.

Para cada nutriente, médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

A aplicação de lodo de esgoto influenciou os teores de Zn no solo, na camada de 0-20 cm, apresentando maiores valores que os observados nos tratamentos testemunha e químico, independentemente da forma de

estabilização do lodo (TAB. 6). Na profundidade de 0-20 cm, no tratamento testemunha (sem adubação) e no tratamento químico, os teores de Zn foram classificados, de acordo com Galvão (2004), como baixos ($0-1,0 \text{ mg dm}^{-3}$) e nos tratamentos com lodo de esgoto, foram classificados como altos ($>1,6 \text{ mg dm}^{-3}$), apesar de, assim como o lodo de esgoto, a adubação química, em especial a fosfatada, ser fonte do elemento, como pode ser observado na TAB. 2.

Considerando as quantidades de lodo de esgoto aplicadas, bem como os teores de Zn no lodo, foram adicionadas ao solo, por meio do lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, quantidades respectivas de 3,22; 15,02; 7,17 e 22,89 kg ha^{-1} de Zn, enquanto, de acordo com Galvão (2004), em solos com baixo teor de Zn, como na presente pesquisa, recomenda-se a aplicação de 6 kg ha^{-1} do micronutriente para o cultivo de girassol. Não foram observadas diferenças estatísticas para os teores de Zn, na profundidade de 20-40 cm, apesar de quando aplicado lodo de esgoto caleado, os teores do micronutriente nessa camada do solo serem classificados como médios e, nos demais tratamentos, como baixo (GALRÃO, 2004).

A aplicação de lodo de esgoto não influenciou os teores de Cu no solo, na profundidade de 0-40 cm (TAB. 6), embora tenham sido aplicadas via lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, quantidades respectivas de 0,49, 2,35, 1,36 e 3,58 kg ha^{-1} de Cu. Considerando o nível médio de Cu no solo antes da instalação do experimento, Galvão (2004) recomenda a aplicação de 0,5 kg ha^{-1} de Cu, para o cultivo do girassol. Contudo, apesar de, no lodo de esgoto compostado, vermicompostado e caleado, a quantidade aplicada ter sido superior à recomendada, não foram constatados sintomas de toxidez na cultura.

A Adição de Pb ao solo, com a aplicação de lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, foi de 0,57; 4,36; 2,29 e 14,39 kg ha^{-1} , respectivamente. Ressalta-se que esses valores estão bem abaixo da carga acumulada teórica permitida pela resolução Conama 375 (BRASIL, 2006) que é de 41 kg ha^{-1} de Pb. Observa-se, na TAB. 6, que os teores de Pb, no solo, na camada de 0-20 cm, quando aplicado lodo de

esgoto solarizado ou caleado, foram superiores aos observados nos tratamentos com lodo de esgoto compostado, vermicompostado, adubação química ou não adubação do solo (testemunha). Na profundidade de 20-40 cm, não foram constatadas diferenças estatísticas para os teores de Pb no solo. Contrário ao observado nesse experimento, Nogueira *et al.* (2007) não constataram diferenças estatísticas nos teores de Pb no solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, quando aplicado lodo de esgoto higienizado, de diferentes formas.

Foram adicionadas ao solo quantidades respectivas de 4,29; 33,54; 16,29 e 41,60 kg ha⁻¹ de Cr, via lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, além de o metal encontrar-se presente também no adubo fosfatado (TAB. 2). Entretanto os teores de Cr no solo foram estatisticamente iguais em todos os tratamentos, nas duas profundidades avaliadas (TAB. 6). Além de não ter sido constatada influência da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores de Cr, o aporte do metal, no solo, ficou bem abaixo da carga acumulada teórica permitida pela resolução Conama 375 (BRASIL, 2006), que é de 154 kg ha⁻¹ de Cr.

Observa-se, na TAB. 7, que, apesar de os teores de Zn no solo terem variado de baixo nos tratamentos sem lodo de esgoto a alto, nos tratamentos onde foi aplicado o resíduo, plantas de girassol adubadas com lodo de esgoto apresentaram os mesmo teores de Zn nas folhas e nos pecíolos que as plantas cultivadas sem adubação ou com adubação química. Os teores observados encontravam-se dentro da faixa de 30 a 80 mg kg⁻¹, que são considerados nutricionalmente adequados (OLIVEIRA, 2004). Vale destacar que, mesmo no tratamento lodo de esgoto caleado, cuja quantidade de Zn aplicada foi 3,8 vezes a recomendada, não houve aumentos de absorção do elemento pela cultura. Esse fato pode estar relacionado à forma do elemento presente no solo, uma vez que durante o processo de caleação são adicionadas grandes quantidades de cal (CaOH) ao lodo que, quando aplicado ao solo, promove a elevação do pH desse, favorecendo a precipitação do elemento. Murtaza *et al.* (2011) observaram correlação negativa entre o pH do solo adubado com lodo de esgoto e a disponibilidade de Zn, promovida, principalmente, pelas reações de precipitação/adsorção do

elemento em razão da elevação do pH.

TABELA 7
Teores de metais pesados na folha e no pecíolo de girassol, em resposta à aplicação de fertilizante mineral e lodo de esgoto estabilizado de diferentes formas

Metais	TRATAMENTOS						CV
	TE	LS	LCO	LV	LCA	AQ	
-----mg kg ⁻¹ -----							%
Folha							
Zn ^{ns}	45,55	54,80	48,80	49,05	51,55	44,55	14,09
Cu ^{ns}	20,25	28,50	18,25	18,75	22,00	19,75	32,65
Pb ^{ns}	26,81	23,69	26,03	29,16	32,28	29,16	26,50
Cr ^{ns}	25,00	25,00	31,25	50,00	31,25	31,25	48,11
Ni ^{ns}	11,17	12,38	12,62	13,10	11,19	13,10	15,34
Cd ^{ns}	1,31	1,49	1,49	1,57	1,37	1,34	27,42
Pecíolo							
Zn ^{ns}	12,80	13,80	15,55	17,80	11,05	8,55	35,74
Cu	6,75 a	6,00 b	5,25 b	4,75 b	7,50 a	5,75 b	12,42
Pb ^{ns}	22,66	29,37	27,94	26,64	26,32	23,88	17,78
Cr ^{ns}	81,20	75,00	62,50	75,00	75,00	100,00	33,35
Ni ^{ns}	175,58	172,87	90,91	133,53	148,10	164,49	35,50
Cd ^{ns}	0,74	0,74	0,68	0,71	0,74	0,84	30,13

Fonte: Da autora

Notas: TE – testemunha; LS – lodo de esgoto solarizado; LCO – lodo de esgoto compostado; LV – lodo de esgoto vermicompostado; LCA – lodo de esgoto caleado; AQ – adubação química. ^{ns} – não significativo.

Para cada nutriente, médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott.

A aplicação de lodo de esgoto ao solo não promoveu aumento nos teores foliares de Cu (TAB. 7) e, com exceção do tratamento com lodo de esgoto solarizado, os níveis ficaram aquém do considerado adequado (25-100 mg kg⁻¹), de acordo com Oliveira (2004), apesar de o aporte de Cu no solo nos tratamentos com lodo de esgoto compostado e caleado ter sido aproximadamente 3 vezes superior ao recomendado para a cultura, na condição de solo do experimento. Como já discutido anteriormente, o lodo de esgoto caleado promove aumento no pH do solo e, de acordo com estudos realizados por Borges e Coutinho (2004a), a elevação do pH em solos adubados com lodo de esgoto provoca a passagem do Cu de formas mais

fitodisponíveis (fase orgânica) para formas mais estáveis (ligado aos óxidos de Fe e Al), sendo que esses autores constataram que somente a fração orgânica contribuiu de forma significativa para os teores de Cu disponível no solo onde houve aplicação de lodo de esgoto. E, mesmo quando ligado à matéria orgânica, o Cu tende a formar composto estável, diminuindo a absorção pelas plantas. Por outro lado, os teores de Cu no pecíolo do girassol foram superiores quando aplicado lodo de esgoto caleado, em relação às demais formas de estabilização do lodo e ao tratamento químico, embora correlação negativa entre o pH de solo adubado com lodo de esgoto e a disponibilidade de Cu tenha sido observada por Murtaza *et al.* (2011).

Plantas de girassol adubadas com lodo de esgoto apresentaram teores de Pb e Cr na folha e no pecíolo semelhantes às plantas do tratamento testemunha (sem adubação) e às plantas que receberam adubação química (TAB. 7), apesar de o teor de Pb no solo apresentar-se superior, com a aplicação de lodo de esgoto caleado e solarizado. Borges e Coutinho (2004a) constataram aumentos nos teores de Pb no solo, em razão da aplicação de lodo de esgoto. Contudo a elevação do pH proporcionou redução significativa nos teores do elemento na fração trocável e aumento na fração orgânica e óxidos, o que pode ter ocorrido na presente pesquisa com a aplicação de lodo de esgoto caleado, resultando em diminuição na disponibilidade do elemento para as plantas de girassol nesse tratamento.

Embora não tenham sido detectados no solo, os elementos Ni e Cd foram detectados na folha e no pecíolo do girassol; no entanto os teores observados nos tratamentos com lodo de esgoto foram semelhantes aos constatados nos tratamentos químicos e testemunha (TAB. 7). Ressalta-se ainda que os teores de Cr e Ni no pecíolo foram, respectivamente, 2,4 e 10,0 vezes superiores aos teores constatados no limbo foliar do girassol. Os resultados revelam a elevada capacidade do girassol de absorver metais do solo, sendo essa espécie utilizada em diversos trabalhos de fitorremediação por ser considerada acumuladora de metais (CUTRIGHT; GUNDA; KURT, 2010; FASSLER *et al.*, 2010; TANDY; SCHULIN; NOWACK, 2006).

4 CONCLUSÃO

A produtividade de girassol é superior, com a aplicação de lodo de esgoto, em relação à adubação química, independentemente da forma de estabilização.

Os maiores teores de nutrientes no solo são proporcionados pela adubação com lodo de esgoto caleado.

O lodo de esgoto compostado e o vermicompostado em geral proporcionam os maiores teores foliares de nutrientes, exceto para N.

Os teores de MO, a CTC(T) e o H+Al do solo não foram influenciados pelas diferentes formas de estabilização do lodo de esgoto.

O lodo de esgoto caleado, aplicado com base nos teores de N disponível e nas exigências da cultura, aumenta a SB, a V% e a CTC(t) do solo, e eleva o pH acima dos níveis considerados adequados para o desenvolvimento das plantas.

O lodo de esgoto solarizado, o compostado e o vermicompostado, aplicados em doses suficientes para suprir a demanda de N da cultura do girassol, não alteram os teores de MO, o pH, a V%, a CTC(t), CTC(T) e H+Al do solo quando comparado à adubação química e ao tratamento sem adubação.

A aplicação de lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, em quantidade suficiente para fornecer o N requerido pelo girassol, aumenta os teores de Zn no solo.

A aplicação de lodo de esgoto solarizado e caleado, em quantidade suficiente para fornecer o N requerido pelo girassol, aumenta os teores de Pb no solo.

A aplicação de lodo de esgoto solarizado, compostado, vermicompostado e caleado, em quantidade suficiente para fornecer o N requerido pelo girassol, não influencia, em geral, os teores de Cu, Cr, Cd, Ni, Pb e Zn na planta.

Considerando apenas um cultivo de girassol, os teores de metais pesados no solo não extrapolam os níveis máximos estabelecidos pela legislação ambiental.

CAPÍTULO 3 - PRODUTIVIDADE E NUTRIÇÃO MINERAL DE GIRASSOL ADUBADO COM DOSES DE LODO DE ESGOTO

RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho avaliar os teores de macronutrientes e metais pesados no solo e na planta, a produtividade de girassol e os atributos do solo, em resposta à adubação com doses de lodo de esgoto. O experimento foi desenvolvido no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), em Cambissolo Háplico. Os tratamentos, distribuídos no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, corresponderam a um tratamento com adubação química e cinco doses de lodo de esgoto aplicadas com base nos teores de N do resíduo e na exigência de N do girassol (0; 4,84; 9,68; 19,36 e 29,04 t ha⁻¹, em base seca). A produtividade de grãos de girassol, com a aplicação de lodo de esgoto é equivalente à observada com a aplicação da adubação química recomendada para a cultura, assim como, de modo geral, não há variação nos teores de nutrientes no solo e na planta, em razão da aplicação de adubo químico ou lodo de esgoto. Embora a aplicação de doses de lodo de esgoto de até 29,04 t ha⁻¹ não influencie os teores de K, Ca e S no solo e de N, P e K na folha de girassol, os teores de Mg no solo e de Ca, Mg e S, na folha e a produtividade aumentam, com o incremento das doses, atingindo valores máximos com a dose citada. Os valores de pH, SB, CTC_(t), CTC_(T), V e H+Al não diferem quando aplicado lodo de esgoto ou fertilizantes químicos. A aplicação de doses lodo de esgoto não influencia o pH, a SB, a CTC_(t), a CTC_(T), a V e o H+Al, na camada de 0-20 cm, porém, na camada de 20-40 cm, aumenta os valores de V e reduz os valores de CTC_(T) e H+Al. Os teores de Zn, no solo e na planta são mais elevados, com a aplicação de lodo de esgoto, quando comparada à adubação química. O aumento das doses de lodo de esgoto resulta em aumentos nos teores de Cu, Ni e Pb, no solo e não apresenta influência sobre os teores de Zn, Fe, Mn, B, Cd e Cr. Na planta, ocorrem aumentos nos teores de Zn, Cu e Mn e redução nos teores de Pb, com o incremento das doses de lodo de esgoto.

Palavras-chave: *Helianthus annuus*. Biossólido. Adubação orgânica.

Resíduos urbanos.

CHAPTER 3 – PRODUCTIVITY AND MINERAL NUTRITION OF SUNFLOWER FERTILIZED WITH DOSES OF SEWAGE SLUDGE

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the content of macronutrients and heavy metals in soil and in the plant, the productivity of sunflower and soil properties in response to fertilization with sewage sludge doses. The experiment was conducted at the Instituto de Ciências Agrárias of the Universidade Federal de Minas Gerais State (ICA / UFMG), in Haplic Cambisol. The treatments were distributed in a randomized block design with four repetitions, corresponding to a treatment with chemical fertilizer and five doses of sewage sludge applied based on the concentration of the residue and the N requirement of sunflower (0, 4.84, 9.68, 19.36 and 29.04 t ha⁻¹ in dry basis). The productivity of sunflower seeds, with the application of sewage sludge is equivalent to that observed with the application of chemical fertilizer recommended for the crop, as well as, in general, there is no variation in nutrient contents in soil and plant in due to the application of chemical fertilizer or sewage sludge. Although the application of sewage sludge doses until 29.04 t ha⁻¹ does not influence the contents of K, Ca and S in soil and of N, P and K the sunflower leaf, the Mg contents in soil and of Ca, Mg and S the leaf and productivity increase, with increasing doses, reaching maximum values at the dose mentioned. The values of pH, SB, CTC (t), CTC (T), V and H + Al do not differ when applied sewage sludge or chemical fertilizers. The application of sewage sludge doses does not influence the pH, SB, CTC (t), CTC (T), V and H + Al, at 0-20 cm layer, however, in the layer of 20-40 cm, the values of V increases and reduces the CTC (T) and H + Al Zn values. The Zn contents in soil and plant are higher, with the application of sewage sludge as compared to chemical fertilizer. The increase of the doses of sewage sludge results in increases in Cu, Ni and Pb in soil and it does not show influence on the concentration of Zn, Fe, Mn, B, Cd and Cr. In the plant, there are increases in the contents of Zn, Cu and Mn and lower contents of Pb, with the increase in doses of sewage sludge.

Keywords: Helianthus annus. Biosolids. Organic fertilization. Urban waste.

1 INTRODUÇÃO

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma eudicotiledônea anual, originária do sudoeste dos Estados Unidos e norte do México. Cultivado inicialmente para o consumo de sua semente, passou a ter a sua farinha utilizada na preparação de alimentos e, no final da primeira guerra mundial, foi utilizado para a fabricação de óleo. Nos últimos anos, com o aumento significativo da demanda por óleos de origem vegetal, impulsionada pela busca de alternativas às energias não renováveis, a semente do girassol tem sido utilizada como opção viável na fabricação de biocombustíveis, pois, além do teor e qualidade do óleo, ela pode ser produzida em larga escala e com alta produtividade (ROSSI, 1998; ZOBIOLE *et al.*, 2010).

A crescente demanda da sociedade pela manutenção e melhoria das condições ambientais tem exigido das autoridades e das empresas públicas e privadas atividades capazes de compatibilizar o desenvolvimento às limitações da exploração dos recursos naturais. Dentre os recursos, os hídricos, que até a geração passada eram considerados fartos, tornaram-se limitantes e comprometidos, em virtude da alta poluição em algumas regiões, necessitando, portanto, de rápida recuperação. Nessas condições, há a necessidade de se tratarem os esgotos urbanos, que hoje são os principais poluidores dos mananciais. No entanto, o tratamento dos esgotos gera um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes, denominado lodo de esgoto, cuja adequada disposição final no ambiente deve constar do planejamento das estações de tratamento (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Considerando o elevado teor de matéria orgânica e nutrientes do lodo de esgoto, a sua utilização agrícola, aproveitando o seu potencial fertilizante e condicionador de solos para promover o crescimento de plantas, representa a possibilidade de associar ganhos para o produtor, por meio do aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais, a ganhos para os geradores de lodo, pela efetivação de métodos adequados e mais econômicos de disposição final desse resíduo, desde que respeitadas as regulamentações relativas às concentrações de agentes poluidores presentes no lodo de esgoto (GUEDES *et al.*, 2006).

Alterações nos atributos do solo, em razão da aplicação de lodo de esgoto, são constantemente relatados na literatura e, muitas vezes, apresentam relação com a forma de estabilização do lodo de esgoto. Oliveira *et al.* (2002) verificaram que o lodo de esgoto aumentou a capacidade de troca de cátions do solo, porém não foram verificados aumentos proporcionais às doses aplicadas. Segundo esses autores, as alterações na CTC foram mais bem explicadas pelas variações no pH provocadas pelo lodo alcalinizado do que pelos acréscimos de C-orgânico.

Aumentos nos teores de carbono orgânico do solo foram constatados por Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008), Galdos, Maria e Camargo (2004) e Rocha, Gonçalves e Moura (2004). Prates *et al.* (2011) avaliaram os atributos de solo adubado com lodo de esgoto e também constataram aumentos nos teores de matéria orgânica do solo, além de aumentos da capacidade de troca catiônica e da acidez potencial, e redução nos valores de saturação por bases. Todavia,

Melo *et al.* (1994) admitem que os efeitos da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores de carbono orgânico do solo são temporários e, geralmente, estão associados a aplicações repetidas ou à aplicação de elevadas doses do resíduo (OLIVEIRA *et al.*, 2002; SOARES *et al.*, 2008).

Embora apresente benefícios, como a melhoria da qualidade química, física e biológica do solo, resultando em aumentos na produtividade das culturas, o lodo de esgoto apresenta alguns elementos potencialmente prejudiciais ao desenvolvimento das plantas e à saúde humana e animal, como a presença de metais pesados, micro-organismos patogênicos e orgânicos persistentes, que podem inviabilizar a utilização agrícola do resíduo.

De acordo com Nascimento *et al.* (2004), a presença de metais pesados constitui uma das principais limitações ao uso do lodo na agricultura. De modo geral, as concentrações de metais encontradas no lodo são muito maiores que as naturalmente encontradas em solos, por isso há a necessidade de avaliação dos riscos relativos ao aumento desses elementos no ambiente, em decorrência da aplicação desse resíduo. Esses riscos dependem de características do solo, tais como: conteúdo original do metal

pesado, textura, teor de matéria orgânica, tipo de argila, pH e capacidade de troca catiônica (CTC).

Como exposto, o efeito benéfico do uso do lodo de esgoto na agricultura tem sido demonstrado em alguns estudos, em várias culturas (CHIARADIA *et al.*, 2009; GALDOS; MARIA; CAMARGO, 2004; GOMES; NASCIMENTO; BIONDI, 2007; LEMAINSKI; SILVA, 2006; NASCIMENTO *et al.*, 2004; SILVA; RESCK; SHARMA, 2002; VIEIRA *et al.*, 2005). Entretanto trabalhos que envolvem a associação do resíduo e a cultura do girassol ainda são escassos. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar os teores de nutrientes no solo e na planta e a produtividade de girassol em resposta a adubação com doses de lodo de esgoto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Instituto de Ciências agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, localizado em Montes Claros - MG, latitude 16°51'38"S e longitude 44°55'00"W, em CAMBISSOLO HÁPLICO, com as seguintes características químicas e físicas, conforme metodologias preconizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997), na camada de 0-20 cm: pH em água = 6,60; P-Mehlich 1 = 1,54 mg dm⁻³; P-remanescente = 25,32 mg L⁻¹; K = 98,00 mg dm⁻³; Ca = 6,70 cmol_c dm⁻³; Mg = 1,60 cmol_c dm⁻³; S = 10,80 mg dm⁻³; Al = 0,00 cmol_c dm⁻³; H + Al = 1,80 cmol_c dm⁻³; soma de bases = 8,55 cmol_c dm⁻³; CTC efetiva = 8,55 cmol_c dm⁻³; m = 0,00%; CTC total = 10,35 cmol_c dm⁻³; V = 83%; Zn = 0,50 mg kg⁻¹; Fe = 59,35 mg kg⁻¹; Mn = 8,25 mg kg⁻¹; Cu = 0,30 mg kg⁻¹; B = 0,00 mg kg⁻¹; Pb = 0,90 mg kg⁻¹; Ni = 0,44 mg kg⁻¹; Cd = 0,00 mg kg⁻¹; Cr = 0,00 mg kg⁻¹; matéria orgânica = 5,18 dag kg⁻¹; areia grossa = 12,90 dag kg⁻¹; areia fina = 25,10 dag kg⁻¹; Silte = 28,00 dag kg⁻¹ e Argila = 34,00 dag kg⁻¹ e, na camada de 20 a 40 cm de profundidade: pH em água = 5,50; P-Mehlich 1 = 0,30 mg dm⁻³; P-remanescente = 15,15 mg L⁻¹; K = 42 mg dm⁻³; Ca = 3,60 cmol_c dm⁻³; Mg = 1,40 cmol_c dm⁻³; S = 10,40 mg dm⁻³; Al = 1,10 cmol_c dm⁻³; H + Al = 4,32 cmol_c dm⁻³; soma de bases = 5,11; cmol_c dm⁻³; CTC efetiva = 6,21

$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $m = 18\%$; $\text{CTC total} = 9,43 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $V = 54\%$; $\text{Zn} = 0,20 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Fe} = 43,15 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Mn} = 0,60 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Cu} = 0,35 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{B} = 0,00 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Pb} = 0,90 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Ni} = 0,35 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Cd} = 0,00 \text{ mg kg}^{-1}$; $\text{Cr} = 0,00 \text{ mg kg}^{-1}$; matéria orgânica = $3,39 \text{ dag kg}^{-1}$; areia grossa = $6,40 \text{ dag kg}^{-1}$; areia fina = $29,60 \text{ dag kg}^{-1}$; silte = $30,00 \text{ dag kg}^{-1}$ e argila = $34,00 \text{ dag kg}^{-1}$.

Utilizou-se o delineamento estatístico de blocos casualizados (DBC), com 6 tratamentos e 4 repetições, sendo um tratamento químico (20 kg ha^{-1} de N, 70 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 30 kg ha^{-1} de K_2O , antes do plantio e 40 kg ha^{-1} de N, 45 dias após emergência) aplicado, de acordo com as recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CFSEMG, 1999) e cinco doses de lodo de esgoto, aplicadas com base nos teores de nitrogênio disponível, calculados de acordo com metodologias e fórmulas descritas na Resolução CONAMA 375 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006) e com a exigência da cultura (CFSEMG, 1999). As doses foram assim definidas: 0; 50; 100; 200 e 300% da necessidade de N do girassol, correspondendo respectivamente às quantidades: 0,00; 4,84; 9,68; 19,36 e $29,04 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto solarizado. Como planta indicadora, utilizou-se o híbrido simples de girassol Helio 250.

O lodo de esgoto foi coletado na estação de tratamento de esgoto (ETE) do município de Juramento – MG. A ETE possui linha de tratamento composta de tratamento preliminar e de reator anaeróbio UASB interligado em série a uma lagoa de pós-tratamento do tipo facultativa e tratamento do lodo de esgoto, por meio do processo de solarização em leito de secagem. Características químicas do lodo de esgoto e quantidades de nutrientes e metais pesados aplicados com as diferentes doses encontram-se nas TAB. 8 e 9.

TABELA 8
Características químicas do lodo de esgoto e quantidades de nutrientes aplicadas com as diferentes doses

Material	Características químicas ¹ (dag kg ⁻¹)					
	N(disp)	P	K	Ca	Mg	S
Lodo de esgoto	0,62	0,36	0,66	0,73	0,27	0,61
Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)	Quantidades aplicadas (kg ha ⁻¹)					
	N _{disp}	P	K	Ca	Mg	S
4,84	30	17	32	35	13	30
9,68	60	35	64	71	26	59
19,36	120	70	128	141	52	118
29,04	180	105	192	212	78	177

Fonte: Da autora

Notas: ¹Metodologias de Tedesco *et al.* (1995).

N_{disp} = teor de nitrogênio disponível, calculado de acordo com a resolução CONAMA 375 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006).

TABELA 9

Teores de metais pesados nos adubos químicos e no lodo de esgoto e quantidades aplicadas no solo com as diferentes doses do resíduo

Material	Características químicas ¹									
	N(disp)	Zn	Fe	Mn	Cu	B	Ni	Pb	Cd	Cr
	kg t ⁻¹	mg kg ⁻¹								
Super fosfato simples	-	142,0	-	-	16,2	-	62	116	116	333
Uréia	-	2,5	-	-	1,62	-	0	8	8	0
Cloreto de Potássio	-	2,5	-	-	4,62	-	15	83	83	0
Lodo de esgoto	6,2	357	23604	182	68,5	16	0,44	0,9	0	0
Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)	Quantidades aplicadas (kg ha ⁻¹)									
	N _{disp}	Zn	Fe	Mn	Cu	B	Ni	Pb	Cd	Cr
4,84	30	1,73	114,24	0,88	0,33	0,077	0,002	0,004	0	0
9,68	60	3,46	228,49	1,76	0,66	0,155	0,004	0,009	0	0
19,36	120	6,91	456,97	3,52	1,33	0,310	0,009	0,017	0	0
29,04	180	10,37	685,46	5,29	1,99	0,465	0,013	0,026	0	0

Fonte: Da autora

Notas: ¹Metodologias de Tedesco *et al.* (1995)

N_{disp} = teor de nitrogênio disponível, calculado de acordo com a resolução CONAMA 375, de agosto de 2006 (BRASIL, 2006).

As adubações referentes aos tratamentos com lodo de esgoto foram realizadas de uma única vez, no sulco de plantio. As parcelas experimentais constituíram-se de quatro linhas de 3 m de comprimentos, espaçadas em 0,80 m, sendo a parcela útil as duas linhas centrais, desprezando-se 0,6 m de cada extremidade. O semeio foi realizado em sulcos, colocando-se três sementes por cova a uma distância de 0,30 m entre plantas. Quinze dias após emergência, fez-se o desbaste, deixando-se apenas uma planta por

cova. Manteve-se a área de cultivo sem a presença de plantas daninhas, por meio de capina manual e fez-se o fornecimento de água à cultura, por meio de irrigação por aspersão.

No início do florescimento do girassol, foram coletadas amostras de folhas do terço superior de 10 plantas, escolhidas aleatoriamente na parcela útil, para análise química dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Zn, Fe, Mn, Cu, B, Pb, Cr, Cd e Ni (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; OLIVEIRA, 2004; TEDESCO *et al.*, 1995).

Quando o girassol apresentava-se na fase (R9), cujos capítulos encontravam-se voltados para baixo, realizou-se a colheita, sendo que, para o cálculo da produtividade corrigiu-se a umidade dos grãos para 13%. Após a colheita, coletou-se entre plantas, na linha, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, 8 sub-amostras de solo por parcela para formarem amostras compostas para análises de P, K, Ca, Mg, S, matéria orgânica, pH, Soma de Bases (SB), CTC efetiva ($CTC_{(t)}$), CTC potencial ($CTC_{(T)}$), saturação por bases (V), H+Al, Zn, Fe, Mn, Cu, B, Pb, Cr, Cd e Ni (EMBRAPA, 1997; TEDESCO *et al.*, 1995).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos que foram adubados com doses de lodo de esgoto foram comparadas com a média do tratamento que recebeu adubação química, a 5% de probabilidade de erro, pelo teste Dunnett. Por outro lado, as médias referentes às doses de lodo de esgoto foram ajustadas a modelos de regressão, testando-se os coeficientes até 10% de probabilidade pelo teste t.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PRODUTIVIDADE E TEORES DE NUTRIENTES NO SOLO E NA PLANTA DE GIRASSOL

De acordo com os resultados da análise de variância, para a variável produção de grãos, houve diferença significativa entre os tratamentos ($p \leq 0,05$). Quando comparada a produtividade média das parcelas que

receberam adubação química a aquelas adubadas com lodo de esgoto, constata-se que a aplicação de lodo de esgoto em doses, a partir da quantidade que fornece o N correspondente à metade da demanda da cultura do girassol ($4,84 \text{ t ha}^{-1}$), promoveu produtividades de grãos semelhantes à obtida com adubação química (TAB. 10), evidenciando o potencial de utilização do lodo de esgoto, em substituição à adubação química, na cultura do girassol. Corroborando esses resultados, Lobo e Grassi Filho (2007) observaram que a aplicação de lodo de esgoto em dose suficiente para suprir 100 ou 150% da demanda de N da cultura do girassol gera produtividade de grãos igual à obtida com a adubação exclusivamente mineral. Entretanto esses autores constataram que, quando aplicado lodo de esgoto em quantidade correspondente a 200% da demanda de N, a produtividade do girassol foi superior à obtida com a adubação química.

Resultados expressivos da aplicação do lodo de esgoto, quando comparado à adubação química, têm sido relatados também para a produtividade de outras culturas. Chiaradia *et al.* (2009) observaram que, quando o lodo de esgoto foi aplicado em quantidade suficiente para fornecer 1 ou 2 vezes o N exigido pela cultura, a produtividade da mamoneira foi superior ao resultado obtido com a adubação química e, quando aplicado em doses suficientes para suprir metade da dose recomendada de N, a planta atingiu produtividade de 93%, em relação à adubação exclusivamente mineral. Assim como, Silva, Resck e Sharma (2002) constataram que o lodo de esgoto foi mais eficiente que a adubação mineral na cultura do milho.

TABELA 10

Valores médios referentes à produtividade de girassol e os teores de nutrientes no solo adubado com fertilizante químico ou com doses de lodo de esgoto

Determinações	Prof. (cm)	Adubação química	Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)					CV (%)
			0	4,84	9,68	19,36	29,04	
Prod. (t ha ⁻¹)	-	2,01 a	0,88 b	1,30 a	1,65 a	2,71 a	2,70 a	28,44
P (mg kg ⁻¹)	0-20	2,68 a	2,24 a	2,34 a	1,66 a	1,21 a	0,92 a	70,82
	20-40	0,31 a	0,46 a	0,36 a	0,33 a	0,29 a	0,31 a	35,94
K (mg kg ⁻¹)	0-20	59,42 a	49,78 a	66,65 a	55,40 a	54,60 a	51,79 a	19,79
	20-40	32,83 a	45,22 a	39,13 a	33,66 a	36,08 a	32,01 a	28,58
Ca (cmolc dm ⁻³)	0-20	6,95 a	6,55 a	7,12 a	6,95 a	6,85 a	7,25 a	8,09
	20-40	4,45 a	4,48 a	4,00 a	3,33 a	3,43 a	4,08 a	28,63
Mg (cmolc dm ⁻³)	0-20	1,80 a	2,40 a	1,80 a	1,70 a	1,70 a	1,80 a	35,40
	20-40	1,20 a	1,50 a	1,40 a	1,20 a	1,30 a	1,50 a	21,94
S (mg dm ⁻³)	0-20	14,80 a	14,40 a	14,60 a	14,30 a	17,40 a	15,10 a	12,80
	20-40	12,40 a	12,30 a	12,70 a	12,30 a	14,80 a	15,50 a	18,78

Fonte: Da autora

Notas: Prof. = profundidade; Prod. = produtividade

Médias de tratamentos referentes às doses de lodo de esgoto com a mesma letra da adubação química, na horizontal, não diferem dessa a 5% de probabilidade, pelo teste Dunnett.

Os teores de P, K, Ca, Mg e S no solo foram semelhantes, independentemente da aplicação de doses de lodo de esgoto ou adubação química (TAB. 10), bem como plantas adubadas com lodo de esgoto ou adubação química apresentaram os mesmos teores foliares de macronutres, exceto para o S, cujos teores foliares de plantas cultivadas em parcelas que não receberam lodo de esgoto foram inferiores ao observado com a adubação química (TAB. 11). Lobo e Grassi Filho (2007) constataram níveis de macronutrientes em folhas de girassol adubado com lodo de esgoto com doses de até 200% da exigência de N da cultura equivalentes àqueles observados em plantas cultivadas com adubação química, inclusive para S, assim como Nogueira *et al.* (2006) não observaram diferenças entre os teores de Ca, Mg e K no solo em parcelas adubadas com lodo de esgoto ou adubação química, entretanto constataram diferenças com relação ao P, cujos teores foram inferiores, com a aplicação de lodo de esgoto.

TABELA 11

Valores médios referentes aos teores de nutrientes na folha de girassol adubado com fertilizante químico ou com doses de lodo de esgoto

Determinações (dag kg ⁻¹)	Adubação química	Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)					CV (%)
		0	4,84	9,68	19,36	29,04	
N	1,95 a	1,99 a	2,04 a	2,14 a	2,10 a	2,05 a	13,20
P	0,27 a	0,23 a	0,25 a	0,24 a	0,27 a	0,26 a	13,85
K	1,87 a	2,06 a	1,84 a	1,78 a	2,04 a	1,96 a	10,69
Ca	3,81 a	3,31 a	3,58 a	3,22 a	3,69 a	3,86 a	10,36
Mg	0,68 a	0,60 a	0,53 a	0,61 a	0,72 a	0,83 a	18,37
S	0,40 a	0,30 b	0,38 a	0,38 a	0,40 a	0,40 a	11,78

Fonte: Da autora

Notas: Médias de tratamentos referentes às doses de lodo de esgoto com a mesma letra da adubação química, na horizontal, não diferem desta a 5% de probabilidade, pelo teste Dunnett.

O aumento nas doses de lodo de esgoto resultou em aumentos na produtividade de grãos do girassol (TAB. 12). De acordo com a equação ajustada, a produtividade média obtida no tratamento que não recebeu lodo de esgoto (0,7 t ha⁻¹) foi inferior à média nacional divulgada no Levantamento Sistemático da Produção agrícola do ano de 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2011) que foi de 1,14 t ha⁻¹. Entretanto a produtividade média nacional seria atingida com a aplicação de apenas 1,33 t ha⁻¹ do resíduo e, com a aplicação da dose que fornece a quantidade de N exigida pela cultura, a produtividade obtida foi 65% superior à média nacional. Corroborando esses resultados, Lobo e Grassi Filho (2007) observaram aumentos na produtividade de girassol, com o aumento das doses aplicadas de lodo de esgoto.

TABELA 12

Equações de regressão relacionando a produtividade de girassol (Prod) e os macronutrientes no solo, com doses de lodo de esgoto

VAR.	PROF.	UN.	EQUAÇÃO	R ²	DL (t ha ⁻¹)	TNS	TMP	CLASSE ¹
Prod	-	t ha ⁻¹	$Y = 0,7032 + 0,3790^{***}X^{0,5}$	0,9059	29,04	2,75	2,75	-
P	0 - 20	mg dm ⁻³	$Y = 2,37998 - 0,2722^*X^{0,5}$	0,7009	0	2,38	0,91	MBx
	20 - 40		$Y = 0,44065 - 0,03002^*X^{0,5}$	0,9932	0	0,44	0,28	MBx
K	0 - 20	mg dm ⁻³	Y = Ym = 55,64	-	-	55,64	55,64	M
	20 - 40		Y = Ym = 37,22	-	-	37,22	37,22	Bx
Ca	0 - 20	cmol _c dm ⁻³	Y = Ym = 6,94	-	-	6,94	6,94	MB
	20 - 40		Y = Ym = 3,86	-	-	3,86	3,86	B
Mg	0 - 20	cmol _c dm ⁻³	$Y = 2,3988 + 0,0501^{***}X - 0,3808^{***}X^{0,5}$	0,9998	29,04	3,65	3,65	MB
	20 - 40		Y = Ym = 1,38	-	-	1,38	1,38	B
S	0 - 20	mg dm ⁻³	Y = Ym = 15,16	-	-	15,16	15,16	MB
	20 - 40		Y = Ym = 13,52	-	-	13,52	13,52	MB

Fonte: Da autora

Notas: DL = dose de lodo de esgoto para atingir maior produtividade ou concentração de nutriente no solo. Var.= variável; UN.= unidade.; PROF. = profundidade

TNS = produtividade máxima ou teor máximo de nutriente no solo.

TMP = teor no solo com a aplicação da dose de lodo de esgoto que gerou máxima produtividade.

¹ Classes de fertilidade segundo Alvarez *et al.* (1999b): A – alto, MB – muito bom, B – bom, M – médio, Bx – baixo, MBx – muito baixo. °, *, **, *** = Significativos a 10; 5; 1 e 0,1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

De acordo com a disponibilidade de P no solo, antes da instalação do experimento no campo, era recomendada a aplicação de 30 kg ha^{-1} do nutriente (CFSEMG, 1999) e, com as doses 4,84; 9,68; 19,36 e $29,04 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto, foram adicionadas ao solo quantidades respectivas de 17; 35; 70 e 105 kg ha^{-1} de P (TAB. 8). Apesar do aumento na quantidade de P aplicada com as doses de lodo de esgoto, houve redução nos teores disponíveis de P, nas duas profundidades avaliadas, como pode ser observado na TAB. 12. Considerando o comportamento da variável produtividade, com o aumento das doses de lodo de esgoto, além da liberação lenta do nutriente, por tratar-se de resíduo orgânico, esses resultados podem estar relacionados à maior extração do nutriente em razão da maior produtividade de sementes. Resultados contrários ao obtido neste experimento foram observados por Chiaradia *et al.* (2009), os quais constataram aumentos nos teores de P, com o aumento da dose de lodo de esgoto, com a ressalva de que, nas parcelas adubadas com lodo de esgoto, foi aplicado também P mineral, na quantidade recomendada para a cultura nas condições daquele experimento, o que pode ter contribuído para uma maior disponibilidade de fósforo no solo, com o aumento da dose de lodo de esgoto. Também, Galdos, Maria e Camargo (2004) observaram aumentos nos teores de P em solo adubado com lodo de esgoto, mas esse comportamento foi observado apenas na camada de 0-5 cm. Embora, nos dois trabalhos mencionados acima, a incorporação do resíduo tenha sido feita à profundidade de 0-10 cm, no presente trabalho as avaliações foram realizadas na profundidade de 0-20 cm, o que pode ter contribuído para a discrepância de resultados, principalmente considerando a baixa mobilidade do P no solo.

A disponibilidade de K no solo, antes da instalação do experimento era considerada como boa. Assim, era recomendada a aplicação de $24,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de K (CFSEMG, 1999). Com as doses 4,84; 9,68; 19,36 e $29,04 \text{ t ha}^{-1}$ foram adicionados ao solo 32; 64; 128 e 192 kg ha^{-1} de K, respectivamente. Uma vez que o K é um elemento que se encontra predominantemente na forma mineral, mesmo na dose que fornece metade da quantidade de N exigida pela cultura ($4,84 \text{ t ha}^{-1}$), a quantidade de K adicionada foi superior à

recomendada, apesar de o lodo de esgoto ser considerado como resíduo pobre em K e a complementação química com esse elemento ser constantemente recomendada (BUENO *et al.*, 2011; GUEDES *et al.*, 2006; SIMONETE *et al.*, 2003). Apesar do aumento das quantidades de K adicionadas com as doses de lodo de esgoto, os teores de K no solo, após o cultivo do girassol foram semelhantes em todos os tratamentos (TAB. 12). Além disso, houve redução na disponibilidade do elemento, em relação aos teores observados antes da implantação do experimento, variando de bom para médio, na camada de 0-20 cm e de médio para baixo, na camada de 20-40 cm de profundidade, de acordo com Alvarez *et al.* (1999b). Zobiolo *et al.* (2010) avaliaram o potencial de extração de nutrientes do solo pelo girassol e constataram que o K é o elemento mais exigido pela cultura, sendo extraído cerca de 286 kg ha⁻¹, para uma produtividade de 3,0 t ha⁻¹.

Assim como observado para K, os teores de Ca e de S no solo não foram influenciados pela aplicação de lodo de esgoto (TAB. 12). Dessa forma, os teores desses elementos após a colheita foram semelhantes em todas as parcelas e nas duas profundidades avaliadas, apesar do aumento da quantidade aplicada desses nutrientes, com o aumento da dose de lodo de esgoto, como pode ser constatado na TAB. 8. Além disso, praticamente, não houve variação entre os teores de Ca observados antes da instalação do experimento e após a colheita do girassol. Segundo Zobiolo *et al.* (2010), o Ca é o segundo elemento mais extraído pela cultura do girassol, atingindo valores próximos de 116 kg ha⁻¹ para uma produtividade de 3,0 t ha⁻¹. Essa elevada extração pode justificar, em parte, os resultados observados, uma vez que houve aumento de produtividade, com o aumento da dose de lodo de esgoto e, mesmo sendo a quantidade de Ca adicionada, via lodo de esgoto superior ao que provavelmente foi extraído, trata-se de material orgânico e parte do Ca pode não ter sido disponibilizada. Por outro lado, foram aplicadas quantidades de 30; 59; 118 e 177 kg ha⁻¹ de S, com as doses respectivas de 4,84; 9,68; 19,36 e 29,44 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, enquanto a quantidade extraída para produção de 3,0 t ha⁻¹ é de aproximadamente 24 kg ha⁻¹.

Com as doses 4,84; 9,68; 19,36 e 29,04 foram adicionadas quantidades respectivas de 13; 26; 52 e 78 kg ha⁻¹ de Mg e, apesar de ser o

nutriente que se encontrava menos concentrado no lodo de esgoto, a aplicação do resíduo resultou em aumentos nos teores do elemento no solo (TAB. 12), sendo que, dentro do intervalo de doses do experimento, o maior valor ($3,65 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi observado quando aplicada a maior quantidade de lodo de esgoto ($29,04 \text{ t ha}^{-1}$).

Assim como observado no solo, para os nutrientes P e K não houve variação dos teores foliares do girassol, em razão do aumento das doses de lodo de esgoto. Comportamento semelhante foi constatado também para o N (TAB. 13). Além disso, os teores ficaram aquém dos considerados adequados, segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Lobo, Grassi Filho e Brito (2011), avaliando o estado nutricional do girassol, com o aumento nas doses de N, constataram que, para os teores nutricionais considerados adequados na folha fossem atingidos, seria necessária a aplicação de 103 kg ha^{-1} de N. Entretanto esses autores trabalharam com adubação mineral e parcelada, o que difere das condições do presente trabalho. Com relação ao P, observa-se que a disponibilidade desse elemento no solo antes do plantio e após a colheita do girassol foi considerada como muito baixa (ALVAREZ *et al.*, 1999b), o que pode ter contribuído para os resultados obtidos.

TABELA 13

Equações de regressão relacionando os teores de nutrientes na folha de girassol com doses de lodo de esgoto

NUTRIENTE	EQUAÇÃO	R ²	DL t ha ⁻¹	TNP dag kg ⁻¹	TMP dag kg ⁻¹	Adequado ¹ (dag kg ⁻¹)
N	Y = Ym = 2,06	-	-	2,06	2,06	3,3 – 3,5
P	Y = Ym = 0,25	-	-	0,25	0,25	0,4 – 0,7
K	Y = Ym = 1,94	-	-	1,94	1,94	2,0 – 2,4
Ca	Y = 3,372 + 0,000607*X ²	0,6742	29,04	3,88	3,88	1,7 – 2,2
Mg	Y = 0,5392 + 0,009270**X	0,8616	29,04	0,81	0,81	0,9 – 1,1
S	Y = 0,3278 + 0,00351**X	0,8081	29,04	0,43	0,43	0,5 – 0,7

Fonte: Da autora

Notas: DL = dose de lodo de esgoto para atingir maior concentração de nutriente na planta.

TNP = teor máximo de nutriente na planta.

¹ Faixa de suficiência de nutrientes na planta, de acordo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

TMP = teor do nutriente na folha de girassol com a aplicação da dose de composto de lodo de esgoto que gerou máxima produtividade.

°, *, **, *** = significativos a 10, 5, 1 e 0,1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Embora não tenham ocorrido aumentos na disponibilidade de Ca e de S, no solo, em razão da aplicação de doses de lodo de esgoto, houve incrementos nos teores foliares desses elementos, assim como houve aumentos também nos teores foliares de Mg (TAB. 13). Mesmo os teores foliares tendo ficado em níveis considerados nutricionalmente baixos para os nutrientes Mg e S, os valores observados, quando aplicada a maior dose de lodo de esgoto, ficaram próximos do considerado adequado. Comportamento diferente foi observado para o Ca, cujos teores foliares foram superiores ao considerado nutricionalmente adequado.

3.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS E ÍNDICES DE FERTILIDADE DO SOLO

Uma das vantagens da utilização do lodo de esgoto como fertilizante agrícola é a elevada quantidade de matéria orgânica presente nesse resíduo. Todavia, conforme apresentado na TAB 14, não houve diferença para essa variável entre as parcelas adubadas com lodo de esgoto, quando comparada às parcelas que receberam fertilizante químico, o que pode estar relacionado com às condições de clima da região, que favorece a rápida mineralização da matéria orgânica, principalmente sob condições de cultivo irrigado. Para os demais atributos, também não foram constatadas diferenças entre a aplicação de lodo de esgoto ou adubação química.

TABELA 14

Valores médios referentes aos atributos do solo adubado com fertilizante químico ou com doses de lodo de esgoto

Determinações	Prof. (cm)	Adub. química	Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)					CV (%)
			0,00	4,84	9,68	19,36	29,04	
MO (%)	0-20	3,85 a	3,77 a	3,98 a	3,94 a	4,20 a	3,97 a	11,34
	20-40	2,37 a	2,44 a	2,28 a	2,30 a	2,47 a	2,34 a	8,32
Ph	0-20	6,93 a	7,00 a	7,03 a	6,78 a	6,98 a	6,93 a	3,65
	20-40	6,30 a	6,35 a	6,23 a	6,13 a	6,05 a	6,28 a	4,17
H+Al (Cmol _c dm ⁻³)	0-20	1,49 a	1,39 a	1,30 a	1,52 a	1,35 a	1,32 a	21,71
	20-40	2,48 a	2,68 a	2,77 a	3,16 a	2,42 a	1,17 a	39,85
SB (Cmol _c dm ⁻³)	0-20	8,93 a	9,03 a	9,07 a	8,79 a	8,69 a	9,18 a	8,54
	20-40	5,78 a	6,09 a	5,55 a	4,66 a	4,79 a	5,66 a	24,04
CTC _(I) (Cmol _c dm ⁻³)	0-20	8,93 a	9,03 a	9,07 a	8,79 a	8,69 a	9,18 a	8,54
	20-40	6,52 a	6,81 a	6,47 a	5,86 a	5,72 a	6,16 a	11,24
CTC _(T) (Cmol _c dm ⁻³)	0-20	10,42 a	10,42 a	10,36 a	10,31 a	10,04 a	10,50 a	5,21
	20-40	8,26 a	8,77 a	8,32 a	7,82 a	7,20 a	6,83 a	11,97
V (%)	0-20	85,08 a	86,52 a	87,35 a	85,13 a	86,49 a	87,43 a	4,29
	20-40	69,89 a	67,12 a	66,26 a	59,87 a	66,54 a	82,49 a	18,46

Fonte: Da autora

Notas: Médias de tratamentos referentes às doses de lodo de esgoto com a mesma letra da adubação química, na horizontal, não diferem dessa a 5% de probabilidade, pelo teste Dunnett.

Como pode ser observado na TAB. 15, não houve influência das doses de lodo de esgoto sobre os teores de matéria orgânica do solo, nas duas profundidades avaliadas, apesar de o lodo de esgoto ser resíduo rico em matéria orgânica. Constata-se, ainda, que os teores de matéria orgânica do solo, que antes da instalação do experimento eram de 5,18 e 3,39 dag kg⁻¹ nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, com classificação boa e média, respectivamente, tiveram seus teores reduzidos para 3,97 e 2,37 dag kg⁻¹, cuja classificação é média (ALVAREZ *et al.*, 1999b). Contrário aos resultados aqui observados, Oliveira *et al.* (2002) observaram aumentos lineares nos teores de carbono orgânico no solo, em razão da aplicação de lodo de esgoto, entretanto esses autores aplicaram doses de até 99 t ha⁻¹. Por outro lado, Barbosa *et al.* (2007), mesmo após o segundo cultivo de milho, constataram efeito da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores de matéria orgânica do solo quando o resíduo foi aplicado em doses aproximadas às do presente experimento (36 t ha⁻¹). Aumentos nos teores de matéria orgânica do solo em razão da aplicação de lodo de esgoto foram também relatados por Chiba, Mattiazzo e Oliveira (2008), Galdos, Maria e Camargo (2004) e Rocha, Gonçalves e Moura (2004).

TABELA 15
Equações de regressão relacionando os atributos do solo com as doses de lodo de esgoto

Variável	Prof.	Equação	R ²	DC t ha ⁻¹	TNS	TMP	Classe ¹
MO %	0-20	Y = Ym = 3,97	-	-	3,97	3,97	M
	20-40	Y = Ym = 2,37	-	-	2,37	2,37	M
pH	0 - 20	Y = Ym = 6,94	-	-	6,94	6,94	A
	20 - 40	Y = Ym = 6,21	-	-	6,21	6,21	A
SB (cmol _c dm ⁻³)	0 - 20	Y = Ym = 8,95	-	-	8,95	8,95	MB
	20 - 40	Y = Ym = 5,35	-	-	5,35	5,35	B
CTC _(t) (cmol _c dm ⁻³)	0 - 20	Y = Ym = 8,95	-	-	8,95	8,95	MB
	20 - 40	Y = 6,87 - 0,12995 °X + 0,003634 °X ²	0,9550	0	6,87	6,16	B
CTC _(T) (cmol _c dm ⁻³)	0 - 20	Y = Ym = 10,33	-	-	10,33	10,33	B
	20 - 40	Y = 8,63 - 0,0667 °X	0,9672	0	8,63	6,69	M
V %	0 - 20	Y = Ym = 86,58	-	-	86,58	86,58	MB
	20 - 40	Y = 63,02 + 0,0203 °X ²	0,7430	29,04	80,14	80,14	MB
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	0 - 20	Y = Ym = 1,38	-	-	1,38	1,38	Bx
	20 - 40	Y = 3,10 - 0,0529 °X	0,6625	0	3,10	1,56	Bx

Fonte: Da autora

Notas: DC = dose de lodo de esgoto para atingir maior produtividade ou concentração de nutriente no solo.

TNS = teor máximo no solo.

TMP = teor no solo com a aplicação da dose de composto de lodo de esgoto que gerou máxima produtividade.

¹ Classes de fertilidade segundo Alvarez *et al.* (1999b): A – alto, MB – muito bom, B – bom, M – médio, Bx – baixo, MBx – muito baixo. ° e * = Significativos a 10 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Não houve influência da aplicação de lodo de esgoto sobre o pH do solo (TAB. 15), que apresentou valores médios de 6,94 na camada de 0-20 e 6,21, na camada de 20-40 cm. Comparando esses valores médios de pH aos valores observados antes da instalação do experimento, 6,60, na camada de 0-20 e 5,50, na camada de 20-40, observa-se que houve aumento do pH nas duas profundidades, inclusive com alteração na classificação agrônômica na camada de 20-40 de bom para alto (ALVAREZ *et al.*, 1999b). Considerando que o lodo de esgoto, quando não passa por processo de eliminação de patógenos, por meio de adição de materiais alcalinizantes, promove redução do pH do solo (BUENO *et al.*, 2011; CALDEIRA JUNIOR *et al.*, 2009; PRATES *et al.*, 2011; TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2008), os aumentos observados neste experimento podem estar relacionados à utilização de água calcária para irrigação (pH: 7,6; condutividade elétrica: 468 us/cm e

dureza total em CaCO_3 : 222 mg/L), uma vez que, mesmo nas parcelas sem adubação constatou-se aumentos no pH em relação aos valores observados antes da instalação do experimento.

Considerando os respectivos teores de Ca, Mg e K no lodo de esgoto de 0,73, 0,27 e 0,66 dag kg^{-1} , com as doses 4,84; 9,68; 19,36 e 29,04 t ha^{-1} de lodo de esgoto, foram adicionadas ao solo quantidades respectivas de 35, 71, 141 e 212 kg ha^{-1} de Ca, 13, 26, 52 e 78 kg ha^{-1} de Mg e 32, 64, 128 e 192 kg ha^{-1} de K. Entretanto, não ocorreram aumentos da SB, em razão da aplicação de lodo de esgoto (TAB. 15) e os valores médios observados, 8,95 e 5,35 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0-20 e 20-40, respectivamente, permaneceram próximos dos valores constatados antes da instalação do experimento (8,55 e 5,11 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0-20 e 20-40, respectivamente). De acordo com Zobiole *et al.* (2010), o girassol extrai, aproximadamente, 116, 42 e 286 kg ha^{-1} de Ca, Mg e K, para uma produtividade de 3,0 t ha^{-1} e, como não houve variação nas médias de SB antes e após o cultivo do girassol, mesmo ocorrendo aumentos na produtividade das culturas, em razão da aplicação de lodo de esgoto (CHIARADIA *et al.*, 2009; GALDOS; MARIA; CAMARGO, 2004; LOBO; GASSI FILHO, 2007; VIEIRA *et al.*, 2005), esses resultados evidenciam o potencial do lodo de esgoto na manutenção da fertilidade do solo.

Na camada de 0-20 cm, não foram constatadas influências das doses de lodo de esgoto sobre a $\text{CTC}_{(t)}$ e a $\text{CTC}_{(T)}$ (TAB. 15). Esses resultados eram esperados, uma vez que a $\text{CTC}_{(t)}$ constitui-se na soma da SB e Al e a $\text{CTC}_{(T)}$ na soma da SB e H+Al, e, antes da instalação do experimento, não havia Al trocável na camada de 0-20 cm, assim como não houve influência da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores de Al e H+Al nessa mesma camada, nem houve aumentos nos teores de matéria orgânica do solo, que, devido à grande quantidade de cargas negativas, poderia aumentar a capacidade de troca catiônica do solo. Por outro lado, na camada de 20-40 cm, houve diminuição da $\text{CTC}_{(t)}$ e da $\text{CTC}_{(T)}$, o que pode estar relacionado à presença de Al trocável nessa camada antes da instalação do experimento e à grande capacidade de complexação desse alumínio pelos ácidos orgânicos decorrentes da decomposição da matéria orgânica (CIOTTA *et al.*, 2004).

A aplicação de lodo de esgoto não influenciou a V%, na camada de 0-20 cm (TAB. 15). Todavia, na camada de 20-40 cm, foram observados aumentos da variável, com o aumento da dose de lodo de esgoto, o que está relacionado à redução dos valores da $CTC_{(T)}$, nessa profundidade. Também para H+Al, não foi constatada influência do lodo de esgoto, na camada de 0-20 cm, mas houve redução dessa variável na profundidade de 20-40 cm, resultado esse possivelmente relacionado à complexação do Al pelos ácidos orgânicos resultantes da degradação da matéria orgânica, como comentado anteriormente.

3.3 TEORES DE METAIS PESADOS NO SOLO E EM PLANTA DE GIRASSOL

Os metais pesados Cd e Cr não foram detectados no solo, por meio do método de análise utilizado. Também a concentração dos metais no lodo de esgoto não ultrapassou a concentração máxima permitida em lodo de esgoto ou produto derivado e a quantidade de metais aplicada no solo não ultrapassou a carga acumulada teórica permitida pela resolução CONAMA nº 375, de agosto de 2006 (BRASIL, 2006).

Na TAB. 16, encontram-se as médias dos teores de metais pesados no solo adubado com lodo de esgoto comparadas às médias obtidas com a adubação química. Como pode ser observado, quando aplicado lodo de esgoto ou adubação química, os teores médios de metais pesados no solo, nas duas profundidades avaliadas, foram semelhantes, exceto para o Zn, na profundidade de 0-20 cm, onde os teores do elemento foram superiores com a adubação com lodo de esgoto na dose de $19,36 \text{ t ha}^{-1}$. Vale ressaltar que, com a aplicação das maiores doses de lodo de esgoto no solo, os teores do elemento foram elevados a níveis classificados como médios, enquanto, nas parcelas que receberam adubação química e na dose 0 e $9,68 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto, foram classificados como baixos (GALRÃO, 2004).

TABELA 16

Valores médios referentes aos teores de metais pesados no solo adubado com fertilizante químico (AQ) ou com doses de lodo de esgoto

Metal	Prof. cm	Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)						CV %	Limite ¹ mg dm ⁻³
		AQ	0,00	4,84	9,68	19,36	29,04		
		-----mg dm ⁻³ -----							
Zn	0-20	0,60 a	0,50 a	1,30 a	0,70 a	1,40 b	1,10 a	45,39	2.800
	20-40	0,20 a	0,23 a	0,35 a	0,25 a	0,65 a	0,48 a	66,17	
Cu	0-20	0,40 a	0,35 a	0,40 a	0,40 a	0,50 a	0,48 a	30,24	1.500
	20-40	0,40	0,20 a	0,30 a	0,30 a	0,40 a	0,40 a	30,41	
Fe	0-20	57,80 a	46,50 a	45,20 a	49,30 a	54,20 a	50,20 a	43,45	-
	20-40	45,50 a	33,73 a	31,93 a	37,35 a	45,20 a	45,55 a	37,82	
Mn	0-20	7,30 a	6,30 a	8,80 a	4,80 a	6,40 a	7,20 a	40,21	-
	20-40	0,48 a	1,20 a	0,78 a	0,73 a	0,60 a	1,23 a	79,15	
B	0-20	0,90 a	0,70 a	0,70 a	0,60 a	0,70 a	0,70 a	18,01	-
	20-40	0,60 a	0,60 a	0,55 a	0,60 a	0,55 a	0,53 a	8,21	
Pb	0-20	1,40 a	1,38 a	1,15 a	1,15 a	1,65 a	1,63 a	29,10	300
	20-40	1,40 a	1,40 a	1,40 a	1,88 a	1,42 a	1,65 a	35,48	
Ni	0-20	0,30 a	0,30 a	0,30 a	0,30 a	0,30 a	0,39 a	35,48	420
	20-40	0,35 a	0,31 a	0,35 a	0,35 a	0,35 a	0,18 a	28,58	

Fonte: Da autora

Notas: AQ = adubação química; Prof = profundidade

¹ Adaptado de USEPA (1999), considerando a densidade do solo igual a 1 g cm⁻³ e 20 cm de profundidade USEPA.

Médias de tratamentos referentes às doses de lodo de esgoto com a mesma letra da adubação química, na horizontal, não diferem dessa a 5% de probabilidade, pelo teste Dunnett.

Apesar de não detectados no solo pelo método analítico, os metais pesados Cd e Cr foram detectados no limbo foliar do girassol, mas os teores desses elementos, assim como dos demais metais pesados, não variaram, em razão da adubação química ou da aplicação de lodo de esgoto (TAB. 17), exceto o teor de Zn, que se apresentou em maiores quantidades na folha quando o girassol foi adubado com doses de 19,36 e 29,04 t ha⁻¹ do resíduo. Corroborando esses resultados, Lobo e Grassi filho (2009) observaram que plantas de girassol cultivadas em solo adubado com lodo de esgoto apresentam teores foliares de Zn superiores às aquelas cultivadas com a adubação química.

TABELA 17

Teores de metais pesados na folha de girassol, em resposta à aplicação de lodo de esgoto ou adubação química

Metais	TRATAMENTOS						CV %
	AQ	Lodo de esgoto (t ha ⁻¹)					
		0,00	4,84	9,68	19,36	29,04	
	-----mg kg ⁻¹ -----						
Zn	38,25 a	35,00 a	39,50 a	44,50 a	50,25 b	51,75 b	9,83
Cu	28,80 a	21,00 a	23,00 a	24,20 a	27,20 a	26,50 a	23,25
Fe	171,50 a	190,50 a	170,25 a	173,75 a	177,25 a	171,25 a	24,27
Mn	26,80 a	21,80 a	25,00 a	33,00 a	30,20 a	30,50 a	33,24
B	84,00 a	73,50 a	92,00 a	75,30 a	67,00 a	86,90 a	23,61
Pb	50,10 a	48,68 a	49,38 a	49,38 a	45,15 a	45,83 a	8,45
Ni	12,50 a	11,10 a	10,60,a	11,50 a	13,50 a	13,50 a	25,09
Cd	0,40 a	0,28 a	0,27 a	0,28 a	0,40 a	0,45 a	79,64
Cr	13,68 a	14,70 a	13,68 a	11,60 a	15,75 a	13,65 a	35,99

Fonte: Da autora

Notas: AQ = adubação química.

Médias de tratamentos referentes às doses de lodo de esgoto com a mesma letra da adubação química, na horizontal, não diferem dessa a 5% de probabilidade pelo teste Dunnett.

De acordo com Galvão (2004), os teores de Zn, no solo de 0-1,0 mg dm⁻³, são classificados como baixos e, para o cultivo do girassol, deve-se aplicar 6 kg ha⁻¹, para correção da deficiência do elemento no solo. Antes da instalação do experimento, os teores de Zn eram 0,50 e 0,20 mg dm⁻³, na camada de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente e, com as doses 4,84; 9,68; 19,36 e 29,04 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, foram aplicadas quantidades

respectivas de 1,73; 3,46; 6,91 e 10,37 kg ha⁻¹ de Zn. Observa-se que, nas maiores doses de lodo de esgoto, as quantidades aplicadas do micronutriente ficaram próximas da recomendada, principalmente considerando que se trata de adubo orgânico e, assim, o elemento não se encontra prontamente disponível no momento da aplicação. Entretanto, apesar do aumento na quantidade aplicada do elemento, não foram observados aumentos nos teores de Zn no solo, em razão da aplicação do lodo de esgoto (TAB.18), o que pode estar relacionado à maior extração do elemento, provocada tanto pela maior produtividade da cultura quanto pelo aumento nos teores do elemento na planta (TAB. 19), com o aumento da dose de lodo de esgoto. Contrariando os resultados aqui obtidos, Borges e Coutinho (2004b) observaram aumentos lineares nos teores de Zn no solo, com o aumento da dose de lodo de esgoto. Entretanto esses autores aplicaram doses que variaram de 0 a 60 t ha⁻¹ de lodo de esgoto com concentrações de Zn aproximadamente 3,5 vezes superiores ao utilizado nesse experimento. Também Zuba-Junio *et al.* (2011) observaram que o lodo de esgoto promove aumentos nos teores de Zn no solo, todavia, embora tenham utilizado lodo de esgoto com teores de Zn equivalentes ao do presente experimento, as doses testadas por esses autores foram bem superiores.

Os teores de Cu no solo aumentaram linearmente, com o aumento das doses de lodo de esgoto (TAB. 18), o que elevou os teores do micronutriente de 0,34 para 0,49 mg dm⁻³, na camada de 0-20 cm de profundidade e de 0,24 para 0,43 mg dm⁻³, na camada de 20-40 cm, com alteração na classificação agrônômica de baixo para médio, em ambas as profundidades (GALRÃO, 2004). Embora tenham ocorrido aumentos nos teores de Cu no solo, em razão da aplicação do lodo de esgoto, não foram constatados riscos de contaminação do solo pelo elemento, uma vez que as quantidades adicionadas de Cu no solo, mesmo com a aplicação da maior dose do resíduo (1,99 kg ha⁻¹ de Cu, quando aplicadas 29,04 t ha⁻¹ de lodo de esgoto), ficaram aquém da recomendada por Galvão (2004), considerando a baixa disponibilidade do elemento no solo antes da instalação do experimento (2 kg ha⁻¹ de Cu, quando os teores no solo estão entre 0-40 mg dm⁻³). Aumentos nos teores de Cu no solo adubado com lodo de esgoto

foram também relatados por Borges e Coutinho (2004b), Galdos, Maria e Camargo (2004), Rangel *et al.* (2004), Silva *et al.* (2006) e Zuba-Junio *et al.* (2011).

TABELA 18
Equações de regressão relacionando os teores de metais pesados no solo às doses de lodo de esgoto

Metal	Prof.	Equação	R ²	DL Mg ha ⁻¹	TMS mg dm ³	Limite ¹ mg dm ⁻³
Zn	0 – 20	Y = Ym = 1,0	-	-	1,0	2.800
	20-40	Y = Ym = 0,39	-	-	0,39	
Cu	0 – 20	Y = 0,34 + 0,0276 °X ^{0.5}	0,8519	29,04	0,49	1.500
	20-40	Y = 0,24 + 0,00659 °X	0,8430	29,04	0,43	
Fe	0 – 20	Y = Ym = 49,08	-	-	49,08	-
	20-40	Y = Ym = 38,75	-	-	38,75	
Mn	0 – 20	Y = Ym = 6,70	-	-	6,70	-
	20-40	Y = Ym = 0,91	-	-	0,91	
B	0 – 20	Y = Ym = 0,68	-	-	0,68	-
	20-40	Y = Ym = 0,56	-	-	0,56	
Ni	0 – 20	Y = Ym = 0,32	-	-	0,32	74
	20-40	Y = 0,30 + 0,011224 °X – 0,00056 °X ²	0,9610	10,02	0,36	
Pb	0 – 20	Y = 1,25 + 0,0005387 °X ²	0,6079	29,04	1,70	300
	20-40	Y = Ym = 1,55	-	-	1,55	

Fonte: Da autora

Notas: DL = dose de lodo de esgoto que resultou em maior concentração de metal pesado no solo.

TMS = teor máximo de metal pesado no solo.

Ym = valor médio; Prof. = profundidade

¹Adaptado de USEPA (1999), considerando a densidade do solo igual a 1 g cm⁻³ e 20 cm de profundidade USEPA.

⁰, * = Significativos a 10 e 5% de probabilidade, pelo teste t, respectivamente.

Embora o Fe tenha sido o metal que se apresentou em maior concentração no resíduo e tendo sido adicionadas, com as doses 4,84, 9,68, 19,36 e 29,04 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, quantidades respectivas aproximadas de 114; 228; 457 e 685 kg ha⁻¹ de Fe, não houve influência da aplicação de lodo de esgoto sobre os teores desse elemento no solo (TAB. 18), sendo as médias observadas nas duas profundidades após a colheita do girassol inferiores às constatadas antes da instalação do experimento.

Os teores iniciais de Mn no solo, na camada de 0-20 cm de 8,25 mg dm⁻³, são classificados como altos, e, nessa situação, segundo Galvão (2004), para o cultivo do girassol, não é necessária a adição de Mn. Com as doses 4,84, 9,68, 19,36 e 29,04 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, foram adicionados ao solo 0,88, 1,76, 3,52 e 5,29 kg ha⁻¹ de Mn, contudo os teores do elemento no solo não foram influenciados pela aplicação das doses de lodo de esgoto (TAB. 18), embora, de acordo com dados apresentados por Zobiolo *et al.* (2011), o girassol extraia apenas cerca de 0,84 kg ha⁻¹ de Mn. Borges e Coutinho (2004b) constataram aumentos nos teores de Mn no solo, com a aplicação de lodo de esgoto, no entanto, assim como relatado para os teores de Zn, o lodo utilizado por esses autores apresentava também teores mais elevados de Mn e foram aplicadas doses superiores às do presente experimento.

Não foi detectado B no solo antes da instalação do experimento, pelo método analítico utilizado. Com as doses 4,84, 9,68, 19,36 e 29,04 t ha⁻¹ de lodo de esgoto foram adicionadas quantidades respectivas de 0,07, 0,16, 0,31 e 0,45 kg ha⁻¹ de B. Como nas condições de solo do presente experimento, Galvão (2004) recomenda a aplicação de 0,4 kg ha⁻¹ de B para o cultivo do girassol. Constatou-se que, apenas com a aplicação da maior dose do resíduo, o aporte de B no solo atingiu os valores recomendados. Mesmo tendo havido aumento na quantidade do elemento adicionada ao solo, com o aumento nas doses de lodo de esgoto, não foi constatada influência da aplicação do resíduo sobre os teores do elemento no solo (TAB. 18), o que pode estar relacionado ao aumento da extração do nutriente, devido ao aumento de produtividade nas maiores doses aplicadas, uma vez que, como citado anteriormente, com a maior dose do resíduo foram adicionados 0,45

kg ha⁻¹ de B e, de acordo com dados apresentados por Zobiole *et al.* (2011), o girassol extrai cerca de 0,37 kg ha⁻¹ do elemento por cultivo.

Não foram constatadas alterações nos teores de Ni no solo, na camada de 0-20 cm, em razão da aplicação de lodo de esgoto. Contudo, na camada de 20-40 cm, os teores de Ni no solo foram influenciados pela aplicação do resíduo (TAB. 18). De acordo com a equação ajustada, a dose que resultou em maior teor do elemento na camada de 20-40 cm, foi 10,02 t ha⁻¹ de lodo de esgoto, sendo observado valor de Ni no solo de 0,36 mg dm⁻³. Apesar do aumento nos teores de Ni, o maior valor observado encontra-se dentro da faixa de 0,14 a 0,62 mg dm⁻³, constatada por Abreu *et al.* (1995), em 31 diferentes amostras de solo. Aumentos nos teores de Ni no solo, em razão da aplicação de lodo de esgoto, foram também constatados por Silva *et al.* (2006).

Houve aumentos nos teores de Pb no solo, com o aumento da dose de lodo de esgoto, na camada de 0-20 cm (TAB. 18). Nas parcelas onde não foi aplicado o resíduo, o valor médio de Pb no solo foi de 1,25 mg dm³ e, com a aplicação da maior dose do resíduo, esse valor passou para 1,70 mg dm³. Embora tenham ocorrido aumentos nos teores de Pb no solo, com as doses de lodo de esgoto, não foram constatados riscos de contaminação, uma vez que Abreu *et al.* (1995), também utilizando o extrator Mehlich 1, constataram teores de Pb que variaram de 1,1 a 2,60 mg dm⁻³, em 31 amostras de solo não contaminados. Aumentos nos teores disponíveis de Pb no solo, em razão da aplicação de doses de lodo de esgoto, foram também relatados por Borges e Coutinho (2004b) e Zuba-Junio *et al.* (2011). Por outro lado, Silva *et al.* (2006) avaliaram os teores disponíveis de Pb, em solos adubados com dois diferentes tipos de lodo de esgoto e não constataram efeito da aplicação do resíduo sobre os teores do elemento no solo.

Embora não tenham sido constatados aumentos nos teores de Zn no solo, os teores do elemento na planta aumentaram linearmente, com o incremento das doses de lodo de esgoto (TAB. 19). Observa-se que, nas parcelas onde não foi aplicado o resíduo (dose zero), os teores médios de Zn, na folha do girassol foram de 36,87 mg kg⁻¹ e, na maior dose aplicada (29,04 t ha⁻¹ de lodo de esgoto), esses teores elevaram-se para 53,78 mg kg⁻¹.

¹. Mas, tanto os valores constatados com a aplicação da menor dose de lodo de esgoto quanto os observados na maior dose do resíduo encontram-se dentro da faixa considerada nutricionalmente adequada por Oliveira (2004) e próximo dos 42,6 mg kg⁻¹, observados por Zobiolo *et al.* (2011), em plantas de girassol, o que demonstra o potencial do lodo de esgoto para o fornecimento desse micronutriente para a cultura.

TABELA 19

Equações de regressão relacionando os teores de metais pesados na planta de girassol com doses de lodo de esgoto

ELEMENTO	EQUAÇÃO	R ²	DL Mg ha ⁻¹	TMP mg kg ⁻¹	ADEQUADO ¹ mg kg ⁻¹
Zn	Y = 36,87 + 0,5824***X	0,9198	29,04	53,78	30-80
Cu	Y = 20,85 + 1,1686°X ^{0,5}	0,9163	29,04	27,15	25-100
Fe	Y = Ym = 176,60	-	-	176,60	80-120
Mn	Y = 22,76 + 1,7669°X ^{0,5}	0,6476	29,04	32,29	10 - 20
B	Y = Ym = 78,94	-	-	78,94	35-100
Ni	Y = Ym = 12,04	-	-	12,04	-
Cd	Y = Ym = 0,34	-	-	0,34	-
Cr	Y = Ym = 13,88	-	-	13,88	-
Pb	Y = 49,50 - 0,144°X	67,90	0	49,50	-

Fonte: Da autora

Notas: DL = dose de lodo de esgoto que resultou em maior concentração de metais na planta, dentro do intervalo experimental.

TNP = teor máximo de metal na planta, dentro do intervalo experimental.

¹ Faixa de suficiência de nutrientes na planta, de acordo com Oliveira (2004).

Assim como observado no solo, o aumento das doses de lodo de esgoto resultou em aumentos nos teores foliares de Cu (TAB. 19). A equação ajustada demonstra que o teor do elemento na folha com a aplicação da maior dose do resíduo (29,04 t ha⁻¹) foi de 27,15 mg kg⁻¹. Esse valor encontra-se dentro da faixa de 25 a 100 mg kg⁻¹, que é considerada adequada para a cultura, segundo Oliveira (2004) e próximo dos 27,94 mg kg⁻¹ observados por Zobiolo *et al.* (2011), em plantas de girassol cultivadas com a adubação recomendada para a cultura. Por outro lado, plantas originárias de parcelas onde não foi aplicado o resíduo não atingiram essa faixa de suficiência (OLIVEIRA, 2004), apresentando teores foliares de Cu de 20,85 mg kg⁻¹. Contrariando os resultados aqui constatados, Lobo e Grassi

Filho (2009) não verificaram aumentos nos teores foliares de Cu em plantas de girassol, em razão do aumento na dose de lodo de esgoto.

Os teores de Fe na planta não foram influenciados pela aplicação do lodo de esgoto (TAB. 19), o que reflete o ocorrido no solo, pois não houve aumento da disponibilidade do elemento, com o aumento da dose do resíduo. Entretanto, os teores médios observados nas folhas de girassol, inclusive nas plantas cultivadas em parcela que não recebeu lodo de esgoto, foi de 176,60 mg kg⁻¹, enquanto a faixa adequada para a cultura é de 80-120 mg kg⁻¹ (OLIVEIRA, 2004). Apesar dos valores observados estarem acima do adequado, ainda ficaram abaixo dos valores constatados por Zobiolo *et al.* (2011), em plantas que receberam adubação química recomendada para a cultura (353 mg kg⁻¹). Resultados semelhantes foram obtidos por Lobo e Grassi Filho (2009), que não constataram aumentos nos teores de Fe, em plantas de girassol, com o aumento da dose de lodo de esgoto, apesar de o teor de Fe no lodo de esgoto utilizado por esses autores ser superior ao do presente experimento.

O aumento na dose de lodo de esgoto resultou em aumentos nos teores foliares de Mn (TAB. 19). Os teores médios do elemento na folha de girassol passaram de 22,76 mg kg⁻¹, quando não aplicado lodo de esgoto, para 32,29 mg kg⁻¹, na maior dose do resíduo. De acordo com Oliveira (2004), plantas de girassol com níveis nutricionais de nutrientes adequados apresentam teores de Mn na folha que variam de 10-20 mg kg⁻¹. Ressalta-se que os valores médios de Mn na folha de girassol no presente experimento foram superiores, até mesmo na dose zero do resíduo, entretanto não foram observados sintomas de toxidez, além dos valores observados encontrarem-se bem abaixo dos 174 mg kg⁻¹, relatados por Zobiolo *et al.* (2011), em plantas de girassol adubadas com fertilizantes minerais. Lobo e Grassi Filho (2009) não observaram aumentos nos teores de Mn em plantas de girassol em razão da aplicação de doses de lodo de esgoto, e, assim como Zobiolo *et al.* (2011), que observaram valores médios bem superiores ao do presente experimento (144 mg kg⁻¹).

Apesar de os teores de Ni terem sofrido influência da aplicação de lodo de esgoto no solo, na planta, não foram detectadas alterações nos teores do

elemento, assim como também não foram observadas alterações nos teores foliares de Cd e Cr, sendo os valores médios apresentados de 12,04; 0,34 e 13,88 mg kg⁻¹, respectivamente.

Como relatado anteriormente, dos metais pesados avaliados que não são considerados nutrientes de plantas, apenas o Pb teve o teor no solo aumentado, em razão da aplicação de lodo de esgoto. No entanto, na planta, ocorreram reduções nos teores do elemento, com o aumento da dose do resíduo (TAB. 19). Assim, plantas oriundas de parcelas que não receberam aplicação de lodo de esgoto apresentaram teores médios foliares de 49,50 mg kg⁻¹ de Pb, enquanto aquelas cultivadas em parcelas que receberam a maior dose do resíduo, apresentaram teores médios de Pb na folha de 45,31 mg kg⁻¹.

4 CONCLUSÃO

De modo geral, não ocorrem variações nos teores dos macronutrientes no solo e na planta quando o girassol é adubado com lodo de esgoto ou com adubação química.

A aplicação de lodo de esgoto, a partir de doses que fornecem a metade de N exigido pela cultura do girassol gera produtividade de grãos equivalente à observada com a aplicação da adubação química recomendada para a cultura.

Os teores de K, Ca e S no solo e os teores de N, P e K na folha de girassol não variam com a aplicação de doses de lodo de esgoto de até 29,04 t ha⁻¹.

A produtividade do girassol aumenta, com o incremento das doses de lodo de esgoto, assim como os teores de Mg, no solo e os teores de Ca, Mg e S, na planta, atingindo os valores máximos com a dose de 29,04 t ha⁻¹.

Os valores de pH, SB, CTC_(t), CTC_(T), V e H+Al não diferem quando aplicado lodo de esgoto ou fertilizantes químicos.

O lodo de esgoto não influencia o pH, a SB, a CTC_(t), a CTC_(T), a V e o H+Al na camada de 0-20 cm e aumenta os valores de V e reduz os valores de CTC_(T) e H+Al, na camada de 20-40 cm.

Os teores de Zn, no solo e na planta são superiores, com a aplicação de lodo de esgoto, quando comparada à adubação química.

A aplicação de lodo de esgoto aumenta os teores de Cu, Ni e Pb, no solo e não apresenta influência sobre os teores de Zn, Fe, Mn, B, Cd e Cr.

Na planta, ocorrem aumentos nos teores de Zn, Cu e Mn e redução nos teores de Pb, com o incremento da dose de lodo de esgoto.

Considerando apenas um cultivo de girassol, os teores de metais pesados no solo não extrapolam os níveis máximos estabelecidos pela legislação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; RAIJ, B. van; SANTOS, W. R. Comparação de métodos de análises para avaliar a disponibilidade de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 463-468, 1995.
- AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of a loamy and a clay soil. **Bioresource Technology**, Essex, v. 71, n. 3, p. 253-259, Feb. 2000.
- ALVAREZ, V. H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO, A. C.; SOUZA, R. B. Uso de gesso agrícola. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Org.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999a. cap. 10, p. 67-78.
- ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Org.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999b. cap. 5, p. 25-32.
- ALVAREZ, V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 10, p. 595-644.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Gestão pública do uso agrícola do lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap. 18, p. 281-312.
- ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em Latossolos repetidamente tratados com biossólido. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 769-776, out./dez. 2000.
- ANTOLIN, M. C.; PASCUAL, I.; GARCIA, C.; POLO, A.; SANCHEZ-DIAZ, M. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 94, n. 2/3, p. 224-237, nov. 2005.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. B.; FONSECA, I. C. B. Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade do milho safrinha. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 601-605, maio/jun. 2007.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.).

Matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 2, p. 7-16.

BEHLING, M.; DIAS, F. C.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; OLIVEIRA, C.; MAZUR, N. Nodulação, acúmulo de nitrogênio no solo e na planta, e produtividade de soja em solo tratado com lodo de estação de tratamento de resíduos industriais. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 453-462, 2009.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: _____. **Lodo de esgoto:** impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2006. cap. 2, p. 25-35.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. 312 p.

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido: I., fracionamento. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 543-555, maio/jun. 2004a.

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólido: II., disponibilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 557-568, maio/jun. 2004b.

BOUMAN, O. T.; CURTIN, D.; CAMPBELL, C. A.; BIEDERBECK, V. O.; UKRAINETZ, H. Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 5, p. 1488-1494, Sept./Oct. 1995.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução n. 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.fundagresorg.br/biossolido/images/downloads/res_conama37506>. Acesso em: 10 nov. 2011.

BUENO, J. R. P.; BERTON, R. S.; SILVEIRA, A. P. D.; CHIBA, M. K.; ANDRADE, C. A.; MARIA, I. C. Chemical and microbiological attributes of an oxisol treated with successive applications of sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1461-1470, jul./ago. 2011.

CALDEIRA JÚNIOR, C. F.; SOUZA, R. A.; SANTOS, A. M.; SAMPAIO, R. S.; MARTINS, E. R. Características químicas do solo e crescimento de *Astronium fraxinifolium* Schott em área degradada adubada com lodo de esgoto e silicato de cálcio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 1, p. 213-218, 2009.

CARNEIRO, C.; SOTTOMAIOR, A. P.; ANDREOLI, C. V. Dinâmica de nitrogênio em lodo de esgoto sob condições de estocagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 987-994, nov./dez. 2005.

CHAGAS, W. F. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da ilha do governador e da penha no Estado do Rio de Janeiro**. 1999. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 1999.

CHIARADIA, J. J.; CHIBA, M. K.; ANDRADE, C. A.; OLIVEIRA, C.; LAVORENTI, A. Produtividade e nutrição de mamona cultivada em área de reforma de canal tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 701-709, maio/jun. 2009.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana-de-açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto: II., fertilidade do solo e nutrição da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 653-662, mar./abr. 2008.

CHUEIRI, 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**, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 502-508, set./out. 2007.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 317-326, mar./abr. 2004.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 359 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação**. São Paulo, 1999. 32 p.

CORRÊA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Modeling the risk of nitrate leaching from two soils amended with five different biosolids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 619-626, jul./ago. 2005.

COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M.; DECARLI, L. D.; PELÁ, A.; SILVA, C. J.; MATTER, U. F.; OLIBONE, D. Compostagem de resíduos sólidos de frigorífico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 100-107, jan./fev. 2009.

CUTRIGHT, T.; GUNDA, N.; KURT, F. Simultaneous hyperaccumulation of multiple heavy metals by *helianthus annuus* grown in a contaminated sandy-loam soil. **International Journal of Phytoremediation**, Philadelphia, v. 12, n. 6, p. 562-573, Aug. 2010.

DORES-SILVA, P. R.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. O. Acompanhamento químico da vermicompostagem de lodo de esgoto doméstico. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 956-961, 2011.

DÜRING, R. A.; GÄTH, S. Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go? **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v. 165, n. 4, p. 544-556, Aug. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

FASSLER, E.; ROBINSON, B. H.; STAUFFER, W.; GUPTA, S. K.; PAPRITZ, A.; SCHULIN, R. Phytomanagement of metal-contaminated agricultural land using sunflower, maize and tobacco. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 136, n. 1, p. 49-58, Feb. 2010.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap. 3, p. 45-68.

FERNANDES, F.; SOUZA, S. G. Estabilização de lodo de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Ed.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima; ABES, 2001. cap. 2, p. 29-55.

FIA, R.; MATOS, A. T.; AGUIRRE, C. I. Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caledado. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 4, p. 287-299, out./dez. 2005.

GALDOS, M. V.; MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A. Atributos químicos e produção de milho em um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 569-577, maio/jun. 2004.

GALRÃO, E. Z. Micronutrientes. In: SOUZA, D. M. G.; LOBADO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. cap. 8, p. 185-226.

GARG, P.; GUPTA, A.; SATYA, S. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: a comparative study. **Bioresource Technology**, Essex, v. 97, n. 3, p. 391-395, Feb. 2006.

GODOY, J. R. R.; MEDEIROS, C. M.; SANTANA, G. P. Vermicompostagem de biossólido obtido de fossas sanitárias, grama e pó de serragem utilizando

Eisenia foetida (Savigny, 1826). **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 5, p. 648-653, set./out. 2009.

GOMES, S. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 459-465, out. 2007.

GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 267-280, mar./abr. 2006.

GUPTA, R.; GARG, V. K. Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 153, n. 3, p. 1023-1030, May 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil: março, 2011. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 22 maio 2011.

JAHNEL, M. C.; MELLONI, R.; CARDOSO, E. J. B. N. Maturidade de composto de lixo urbano. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 301-304, 1999.

JOSHUA, W. D.; MICHALK, D. L.; CURTIS, I. H.; SALT, M.; OSBORNE, G. J. The potential for contamination of soil and surface waters from sewage sludge (biosolids) in a sheep grazing study, Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v. 84, n. 1/3, p. 135-156, June 1998.

KHWAIRAKPAM, M.; BHARGAVA, R. Vermitechnology for sewage sludge recycling. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 161, n. 2/3, p. 948-954, Jan. 2009.

KIDD, P. S.; DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, M. J.; DÍEZ, J.; MONTERROSO, C. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. **Chemosphere**, Oxford, v. 66, n. 8, p. 1458-1467, Jan. 2007.

LAVADO, R. Effects of sewage-sludge application on soils and sunflower yield: quality and toxic element accumulation. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, v. 29, n. 6, p. 975-984, June 2006.

LEITE, R. A.; PAULA JÚNIOR, T. J.; VENZON, M. Girassol. In: PAULA JÚNIOR, T. J.; VENZON, M. (Ed.). **101 culturas**: manual de tecnologias agrícolas. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. p. 397-404.

LEMAINSKI, J.; SILVA, J. E. Avaliação agrônômica e econômica da aplicação de biossólido na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1477-1484, out. 2006.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H. Níveis de lodo de esgoto na produtividade do girassol. **Revista Ciencia del Suelo e Nutrición Vegetal**, Temuco, v. 7, n. 3, p. 16-25, 2007.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H. Sewage sludge levels on the development and nutrition of sunflower plants. **Revista Ciencia del Suelo e Nutrición Vegetal**, Temuco, v. 9, n. 3, p. 245-255, 2009.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BRITO, I. C. A. Efeito do nitrogênio na nutrição do girassol. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 3, p. 380-391, May/June 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARIN, L. M. K. S.; BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C. V.; CARAFINI, C.; LIMA, M. R.; SERRAT, B. M.; MOCHIDA, G. A. M. Determinação da taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado por processo alcalino em solos da região metropolitana de Curitiba. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 113-118, abr./jun. 2010.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap. 5, p. 109-141.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R. A.; LEITE, S. A. S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 3, p. 449-455, 1994.

MOLINA, M. V.; MATTIAZZO, M. E.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F. Nitrogênio e metais pesados no solo e em árvores de eucalipto decorrentes da aplicação de biossólido em plantio florestal. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 25-35, ago. 2006.

MORGAN, J. E.; MORGAN, A. J. The distribution and intracellular compartmentation of metals in the endogeic earthworm *Aporrectodea caliginosa* sampled from an unpolluted and a metal-contaminated site. **Environmental Pollution**, Barking, v. 99, n. 2, p. 167-175, 1998.

MURTAZA, G.; HAYNES, R. J.; NAIDU, R.; BELYAEVA, O. N.; KIM, K. R.; LAMB, D. T.; BOLAN, N. S. Natural attenuation of Zn, Cu, Pb and Cd in three biosolids-amended soils of contrasting pH measured using rhizon pore water

samplers. **Water, Air, Soil and Pollution**, Dordrecht, v. 221, n. 2, p. 351-363, 2011.

NAIR, J.; SEKIOZOIC, V.; ANDA, M. Effect of pre-composting on vermicomposting of kitchen waste. **Bioresource Technology**, Essex, v. 97, n. 16, p. 2091-2095, Nov. 2006.

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C.; OLIVEIRA, A. B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 385-392, mar./abr. 2004.

NDEGWA, P. M.; THOMPSON, S. A. Integrating composting and vermicomposting in the treatment and bioconversion of biosolids. **Bioresource Technology**, Essex, v. 76, n. 2, p. 107-112, Jan. 2001.

NDEGWA, P. M.; THOMPSON, S. A.; DAS, K. C. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. **Bioresource Technology**, Essex, v. 71, n. 1, p. 5-12, Jan. 2000.

NOGUEIRA, T. A. R.; SAMPAIO, R. A.; FERREIRA, C. S.; FONSECA, I. M. Produtividade de milho e de feijão consorciados adubados com diferentes formas de lodo de esgoto. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 122-131, jan./jun. 2006.

NOGUEIRA, T. A. R.; SAMPAIO, R. A.; FONSECA, I. M.; FERREIRA, C. S.; SANTOS, S. E.; FERREIRA, L. C.; GOMES, E.; FERNANDES, L. A. Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 331-338, maio/jun. 2007.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 8, p. 471-550.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 505-519, 2002.

OLIVEIRA, K. W.; MELO, W. J. de; PEREIRA, G. T.; MELO, V. P. de; MELO, G. M. P. de. Heavy metals in Oxisols amended with biosolids and cropped with maize in a long-term experiment. **Sciencia Agrícola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 381-388, jul./ago. 2005.

OLIVEIRA, S. A. Análise foliar. In: SOUZA, D. M. G.; LOBADO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. cap. 10, p. 245-255.

PASSAMANI, F. R. F.; KELLER, R. P.; GONCALVES, R. F. Higienização de lodo utilizando caleagem e pasteurização em uma pequena estação de tratamento de esgoto combinando reator UASB e biofiltro aerado submerso. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún. **Anales...** Cancún, 2002. 1 CD-ROM.

PEDROZA, J. P.; HAANDEL, A. C. V.; BELTRÃO, N. E. de M.; DIONÍSIO, J. A. Produção e componentes do algodoeiro herbáceo em função da aplicação de biossólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 483-488, set./dez. 2003.

PRADO, R. M.; LEAL, R. M. Desordens nutricionais por deficiência em girassol var. Catissol-01. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 3, p. 187-193, set./dez. 2006.

PRATES, F. B. S.; SAMPAIO, R. A.; SILVA, W. J.; FERNANDES, L. A. F.; ZUBA-JUNIO, G. R.; SATURNINO, H. M. S. Crescimento e teores de macronutrientes em pinhão manso adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 101-112, abr./jun. 2011.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A. G. Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 247-253, mar. 2005.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W.; GUILHERME, L. R. G.; DYNIA, J. F. Acúmulo de Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em latossolo vermelho adubado com fontes de lodo de esgoto e cultivado com milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 15-23, jan./fev. 2004.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 623-639, jul./ago. 2004.

RODRIGUEZ, M. B.; GODEAS, A.; LAVADO, R. S. Soil acidity changes in bulk soil and maize rhizosphere in response to nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 17/18, p. 2597-2607, 2008.

RODRÍGUEZ-CANCHÉ, L. G.; VIGUEROS, L. C.; MALDONADO-MONTIEL, T.; MARTÍNEZ-SANMIGUEL, M. Pathogen reduction in septic tank sludge through vermicomposting using *Eisenia fetida*. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, n. 10, p. 3548-3553, Oct. 2010.

ROSSI, R. O. **Girassol**. Curitiba: Tecnoagro, 1998. 333 p.

SCHNEITER, A. A.; MILLER, J. F. Description of sunflower growth stages. **Crop Science**, Madison, v. 21, n. 6, p. 901-903, 1981.

SILVA, C. A.; RANGEL, O. J. P.; DYNIA, J. F.; BETTIOL, W.; MANZATTO, C. V. Disponibilidade de metais pesados para milho cultivado em latossolo sucessivamente tratado com lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 353-364, mar./abr. 2006.

SILVA, C. A.; VALE, F. R.; GUILHERME, L. R. G. Efeito da calagem na mineralização do nitrogênio em solos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 3, p. 471-476, 1994.

SILVA, C. D.; COSTA, L. M.; MATOS, A. T.; CECON, P. R.; SILVA, D. D. Vermicompostagem de lodo de esgoto urbano e bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 487-491, set./dez. 2002.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 7, p. 275-356.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agrônômica para o biossólido produzido no Distrito Federal: I., efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 487-495, 2002.

SILVA, M. N. **A cultura do girassol**. Jaboticabal: FUNEP, 1990. 67 p.

SILVA, P. R. F.; FREITAS, T. F. S. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 843-851, maio/jun. 2008.

SIMONETE, M. A.; KIEHL, 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**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1187-195, out. 2003.

SOARES, E. M. B.; SILVA, C. A.; DIAS, B. O.; BETTIOL, W.; BELIZÁRIO, M. H. Frações da matéria orgânica de Latossolo sob influência de doses de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 9, p. 1231-1240, set. 2008.

SOCCOL, V. T.; PAULINO, R. C. Riscos de contaminação do agroecossistema com parasitos pelo uso do lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.;

CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap. 15, p. 245-258.

SOUZA, A.; OLIVEIRA, M. F.; CASTIGLIONI, V. B. R. O boro na cultura do girassol. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 25, n. 1, p. 27-34, jan./mar. 2004.

STEVENS, J. L.; NORTHCOTT, G. L.; STERN, G. A.; TOMY, G. T.; JONES, K. C. PAHs PCBs PCNs organochlorine pesticides synthetic musks and polychlorinated n-alkanes in UK sewage sludge: survey results and implications. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 37, n. 3, p. 462-467, 2003.

TANDY, S.; SCHULIN, R.; NOWACK, B. The influence of EDDS on the uptake of heavy metals in hydroponically grown sunflowers. **Chemosphere**, Oxford, v. 62, n. 9, p. 1454-1463, 2006.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).

TRANNIN, I. C. de 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**, Campina Grande, v. 12, n. 3, p. 223-230, maio/jun. 2008.

UNGARO, M. R. G. **Cultura do girassol**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 36 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A guide to the biosolids risk assessment for the EPA: part 503 rules**. Cincinnati, 1995. EPA/832-B-93-005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Title 40 CFR: part 503: final rules standards for the use for disposal of sewage sludge**. Washington, 1999. Disponível em: <<http://www.epa.gov/>>. Acesso em: 10 set. 2011.

VIEIRA, R. F.; TANAKA, R. T.; TSAI, S. M.; PÉREZ, D. V.; SILVA, C. M. M. S. Disponibilidade de nutrientes no solo, qualidade de grãos e produtividade da soja em solo adubado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 9, p. 919-926, set. 2005.

VIJVER, M. G.; VINK, J. P. M.; MIERMANS, C. J. H.; GESTEL, C. A. M. van. Metal accumulation in earthworms inhabiting floodplain soils. **Environmental Pollution**, Barking, v. 148, n. 1, p. 132-140, July 2007.

VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. 12, p. 299-226.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, nov./dez. 2008.

ZOBIOLE, L. H. S.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Marcha de absorção de macronutrientes na cultura do girassol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 425-433, mar./abr. 2010.

ZOBIOLE, L. H. S.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; MOREIRA, A. Sunflower micronutrient uptake curves. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 346-353, mar./abr. 2011.

ZUBA-JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; SANTOS, G. B.; NASCIMENTO, A. L.; PRATES, F. B. S.; FERNANDES, L. A. Metais pesados em milho fertilizado com fosfato natural e composto de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 10, p. 1082-1088, out. 2011.