

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS - UNIFAL-MG

RÔMULO SPURI BARBOSA

**EFEITO DO LODO DE ESGOTO EM LATOSSOLO
VERMELHO E NA CULTURA DO MILHO**

Alfenas/MG
2016

RÔMULO SPURI BARBOSA

**EFEITO DO LODO DE ESGOTO EM LATOSSOLO
VERMELHO E NA CULTURA DO MILHO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
Coorientador: Prof. Dr. Breno Régis Santos
Colaboradores: Prof. Dr. Douglas José Marques (Unifenas) e Márcio Donizetti de Andrade (Cooxupé)

Alfenas/MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal de Alfenas

Barbosa, Rômulo Spuri.
Efeito do lodo de esgoto em latossolo vermelho e na cultura do milho /
Rômulo Spuri Barbosa. -- Alfenas - MG, 2016.
62 f.

Orientador: Ronaldo Luiz Mincato.
Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal
de Alfenas, 2016.
Bibliografia.

1. Lodo de esgoto. 2. Eliminação de Resíduos. 3. Safras. 4. Milho -
Cultivo. I. Mincato, Ronaldo Luiz. II. Título.

CDD-628.364



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas / UNIFAL-MG
Programa de Pós-graduação – Ciências Ambientais
Rua Gabriel Monteiro da Silva, 714. Alfenas - MG CEP 37130-000
Fone: (35) 3299-1379(Coordenação) / (35) 3299-1392 (Secretaria)
<http://www.unifal-mg.edu.br/ppgca/>



RÔMULO SPURI BARBOSA

“Efeito do lodo de esgoto em Latossolo Vermelho e na cultura do milho”.

A Banca julgadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de Pesquisa: Ciências Ambientais.

Aprovado em: 28 de janeiro de 2016.

Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato
Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura: _____

Prof. Dr. Douglas José Marques
Instituição: UNIFENAS

Assinatura: _____

Prof. Dr. Thiago Corrêa de Souza
Instituição: UNIFAL - MG

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por ter acreditado em mim desde o começo e com todo amor possibilitou essa conquista.

Ao Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato, pela orientação, amizade e todas as oportunidades oferecidas na minha caminhada.

À CAPES, pela bolsa de estudo.

À Universidade Federal de Alfenas, pelo suporte institucional.

À Unifenas, pela prontidão em contribuir em etapas essenciais do projeto.

À Coságua, por ter cedido espaço para estudo e coleta na ETE de Paraguaçu – MG.

À Cooxupé, pela importante parceria nas etapas laboratoriais.

Ao Prof. Dr. Breno Régis Santos, pela orientação.

Ao Robert Marques, Joaquim Ernesto, Patrick Ribeiro, Douglas Manoel, Nikolas Freire, Ericka Kaori, Rodrigo César Pereira Nicolau e Leonardo Fávero pela ajuda em etapas da condução do projeto.

A todos os colegas do Laboratório de Geociências.

À Carolina, pela confiança e companheirismo.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O lodo de esgoto é o resíduo obtido no tratamento das águas residuárias municipais. Devido aos teores de matéria orgânica, de macro e micronutrientes pode ser destinado à agricultura, por acrescentar elementos que podem melhorar as características do solo e consecutivamente o potencial agrícola das lavouras. Todavia, os lodos podem conter elevadas concentrações de metais pesados, patógenos e compostos orgânicos persistentes que oferecem riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do lodo da Estação de Tratamento de Esgotos de Paraguaçu – MG como insumo agrícola. Para tanto, foi conduzido um experimento em vasos em um delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições, onde foi plantando o milho (*Zea mays* L.) em um Latossolo Vermelho adubado com lodo de esgoto, nas concentrações equivalentes a 0, 10, 20, 40, 80 e 160 t ha⁻¹ em base seca. Foi avaliada a resposta da aplicação das diferentes doses de lodo de esgoto nos teores de P, K, Ca, Mg, S, Zn, Mn, Pb, Cd, Cr, Ni, H + Al, CTC, SB, V % e metais pesados no solo e na produtividade do milho. O lodo de esgoto estudado atendeu à legislação brasileira com relação aos teores de metais pesados e melhorou as características químicas do solo, aumentando o seu potencial agrícola. A produtividade do milho aumentou com a adição de lodo de esgoto ao solo, sendo a dose de 160 t ha⁻¹ a que mais obteve respostas positivas. Além disso, o lodo de esgoto não causou efeitos deletérios ao solo e à produção de milho, configurando o alto potencial para uso na agricultura.

Palavras-chave: Biossólidos. Alternativa de disposição. Uso agrícola. Cultivo do milho.

ABSTRACT

The sewage sludge is the residue obtained from the treatment of municipal wastewater. Due to the levels of organic matter, macro and micronutrients can be destined to agriculture, by adding elements that can improve soil characteristics and consecutively the agricultural potential of crops. However, the sludges can contain high concentrations of heavy metals, which offer risks to human health and the environment. Therefore, the objective of this work was to evaluate the use of sewage sludge of sewage treatment plant of Paraguaçu - MG as agricultural input. It was conducted an experiment in pots in a completely randomized design, with six repetitions, where was planting the corn (*Zea mays* L.) in a Red Latosol fertilized with sewage sludge, in equivalent concentrations 0, 10, 20, 40, 80 e 160 t ha⁻¹ on a dry basis. It was evaluated the response of the application of different doses of sewage sludge in concentrations of P, K, Ca, Mg, S, Zn, Mn, Pb, Cd, Cr, Ni, H + Al, CTC, SB, V % and heavy metals of the soil and productivity of corn. The sewage sludge studied attended the Brazilian legislation with respect to the levels of heavy metals and improved the chemical characteristics of soil, increasing their agricultural potential. The corn productivity increased with the addition of sewage sludge to soil, being the dose of 160 t ha⁻¹ the most positive responses obtained. In addition, the sewage sludge caused no deleterious effects on the quality of soil and corn production, recommending the high potential for use in agriculture.

Key words: Biosolids. Alternative of disposition. Agricultural use. Cultivation of corn.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	07
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	08
2.1	Tratamento dos esgotos.....	08
2.2	Lodo de esgoto.....	09
2.3	Disposição de lodo de esgoto em solos agrícolas	09
2.4	Efeito do lodo de esgoto nos atributos químicos do solo	11
2.5	Efeito do lodo de esgoto nas plantas	13
2.6	Cultura do milho.....	15
	REFERÊNCIAS	16
	SEGUNDA PARTE	23
	ARTIGO I Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho em função da aplicação de lodo de esgoto	24
	RESUMO.....	26
	ABSTRACT.....	27
	INTRODUÇÃO	28
	MATERIAL E MÉTODOS	29
	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIA	40
	ARTIGO II Efeito do lodo de esgoto na produtividade do milho	44
	RESUMO.....	46
	ABSTRACT.....	47
	INTRODUÇÃO	48
	MATERIAL E MÉTODOS	49
	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIA	54
	QUADROS	57
	FIGURAS	59

1 INTRODUÇÃO

A disposição final do lodo de esgoto em solos é uma alternativa que permite que Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) e a agricultura se tornem mais sustentáveis. O gerenciamento do lodo resulta em um alto custo para as ETE e a prática agrícola é uma alternativa eficiente. Pois, além de disponibilizar um adubo acessível para os produtores de baixa renda, promove a reintegração de um produto de descarte ao ciclo produtivo (NUVOLARI et al., 2011) e aumenta os teores de nutrientes e matéria orgânica do solo, gerando uma economia com insumos agrícolas (CEZAR et al., 2012).

Os Latossolos são os solos predominantemente no Brasil. Apresentam avançado estágio de intemperização, são fortemente ácidos e com baixa soma de bases (SB) (OLIVEIRA, 2005). Portanto, a aplicação de lodo de esgoto pode incrementar a qualidade desses solos e sua aptidão agrícola.

Todavia, o lodo de esgoto pode conter teores de metais pesados, dependendo do grau de industrialização do município e da eficiência na gestão dos resíduos nas indústrias. O uso do lodo de esgoto na agricultura é recomendável apenas quando possuir teores de metais pesados que não causem danos à cadeia trófica e ao meio ambiente (BERTOLI et al., 2011). No Brasil, esses limites foram estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), pelas Resoluções 375 e 380 de 2006 (CONAMA, 2006). Assim, a prévia caracterização química do lodo de esgoto é basilar para definição de sua viabilidade para aplicação em solos agrícolas. Entretanto, mesmo com teores de metais pesados no lodo abaixo dos limites estabelecidos pela legislação nacional, esses elementos podem ser mobilizados e causarem impactos aos solos e às plantas, com efeitos tóxicos na produção agrícola.

A eficiência do manejo do solo na cultura agrícola é avaliada pela capacidade de aumentar a produtividade das lavouras. A cultura do milho no Brasil necessita de avanços tecnológicos para impulsionar a produtividade, pois embora seja o terceiro produtor mundial, muitas regiões produzem baixas quantidades do grão, devido em grande parte, à baixa fertilidade dos solos, que é causada pela redução dos teores e da qualidade da matéria orgânica e pela diminuição dos teores de macro e micronutrientes (CONAB, 2016).

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos causados por doses crescentes de lodo de esgoto do Município de Paraguaçu em um Latossolo Vermelho e na produtividade do milho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A seguir é apresentada uma revisão de literatura atualizada acerca dos temas abordados nessa dissertação, com intuito de embasamento teórico para a análise e discussão dos resultados.

2.1 Tratamento dos esgotos

O tratamento dos esgotos domésticos gerado nos municípios é fundamental para a manutenção e conservação das condições ambientais e para garantir a qualidade dos corpos receptores, uma vez que permite que essas águas residuárias retornem para o ambiente sem causarem poluição (TSUTIYA et al., 2002). As ETE também solucionam o problema sanitário, pois quando não tratados, os esgotos são o meio de perpetuação de ciclos epidemiológicos (CORCORAN et al., 2010).

O processo de tratamento dos esgotos remove grande parte dos poluentes presentes nos dejetos urbanos. Para tanto, o método utilizado depende das características operacionais e tecnológicas da ETE e das características físicas, químicas e biológicas dos esgotos. Normalmente, o tratamento consiste em três etapas: a) Preliminar: remoção dos resíduos sólidos que chegam junto com o esgoto por meio de grades e telas e a desarenação, que remove terra, areia e cascalho; b) Primário: decantação primária que remove os compostos mais densos, pela retenção por várias horas no tanque de sedimentação, em que a maior parte desse material é sedimentado e forma o “lodo primário” ou “lodo cru” e c) Secundário: o tanque de aeração ou reator anaeróbico, habitado por um consórcio microbiano, que recebe o esgoto da etapa anterior e promove o crescimento do metabolismo celular, viabilizando os processos de decomposição e a estabilização da matéria orgânica (VON SPERLING, 2012) e que, de acordo com SABESP (2008), remove em torno de 90 a 95 % da carga orgânica.

A partir da queda no metabolismo, o consórcio microbiano e seus metabólitos são retirados do tanque, gerando o lodo de esgoto, que pode conter microrganismos patogênicos e substâncias orgânicas e inorgânicas causadoras de danos aos solos, aos recursos hídricos e à cadeia trófica (ESCUDEY et al., 2011). Portanto, se por um lado as ETE contribuem para

preservação da qualidade dos recursos hídricos, em contrapartida, gera um resíduo que necessita de disposição final ambientalmente adequada.

2.2 Lodo de esgoto

O lodo de esgoto é um resíduo semissólido, predominantemente orgânico e contém, em média, 55 % de matéria orgânica proveniente de proteínas, carboidratos e gorduras presentes nas águas residuárias (PEQUENO et al., 2008). A matéria orgânica do lodo bem digerido resulta principalmente em húmus, que é o resultado da ação de diversos microrganismos, apresentando em média 58 % de carbono e 5 % de N (CARVALHO et al., 2015).

Complexada a matéria orgânica, o lodo de esgoto carrega materiais inorgânicos, como minerais e metais pesados. Segundo Fjallborg et al. (2005), geralmente, são encontrados teores significativos de N, P, S e Mg, além de outros elementos químicos como Potássio (K), Ca, B, Zn, Mn, Cu, Níquel (Ni), Cádmiio (Cd), Cromo (Cr) e Chumbo (Pb). Todavia, com teores variáveis de acordo com o sistema de tratamento empregado, com a época do ano em que foi gerado e com a sua origem, que é diferenciada pelo grau de industrialização da região e o nível sociocultural da população (GARCÍA-DELGADO et al., 2007).

As patologias da população são disseminadas nas águas residuárias. Portanto, vírus, bactérias, protozoários e helmintos fazem parte da composição do lodo de esgoto. Entre esses microrganismos estão os coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus entérico (BASTOS et al., 2003).

2.3 Disposição de lodo de esgoto em solos agrícolas

Segundo Von Sperling (2012), cidades que aumentaram a coleta e o nível de tratamento de esgotos têm encontrado dificuldades em dispor adequadamente o lodo produzido. Entre as alternativas de disposição final estão os aterros sanitários, áreas agrícolas e florestais e a incorporação na produção de materiais para construção civil (CASTRO; SILVA; SCALIZE, 2015), mas apenas a utilização de aterro sanitário exclusivo e utilização

agrícola se apresentavam como alternativas sustentáveis capazes de absorver as quantidades de lodos gerados nas ETE (TSUTIYA, 2000). Todavia, os aterros sanitários exigem o monitoramento constante, mesmo após o seu fechamento.

No Brasil, o descarte ainda é normalmente realizado em aterros sanitários (CASTRO; SILVA; SCALIZE, 2015), o que intensifica o problema com os resíduos urbanos e vai de encontro à Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê a redução de resíduos sólidos úmidos dispostos em aterros sanitários (BRASIL, 2010). O método de maior benefício ambiental e econômico é a utilização nas práticas agrícolas, que além de ser uma solução de longo prazo para a destinação desses resíduos, é um fertilizante e condicionador de solos (BUENO et al., 2011; MOREIRA; MINCATO; SANTOS, 2013)

A utilização do lodo de esgoto na agricultura adiciona elementos ao solo que podem alterar suas propriedades químicas, físico-químicas e biológicas afetando, em geral, positivamente o desenvolvimento das plantas (PEDROZA et al., 2010). Segundo Dynia, Souza e Boeira (2006), tal utilização do lodo de esgoto também contempla um importante aspecto da sustentabilidade, que é a reciclagem dos nutrientes, da energia e da matéria orgânica. A utilização desse material como fertilizante pode contribuir para economizar reservas minerais e energia elétrica utilizados na fabricação de fertilizantes minerais industrializados.

No estudo na ETE do Distrito Federal, Vieira (2007) relata a produção de 400 toneladas de lodo de esgoto diariamente, sendo suficiente para fertilizar até 5.000 hectares por ano, com economia de R\$ 3,8 milhões na compra de ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio.

Os teores de metais pesados, por sua vez, são geralmente maiores nos lodos de esgotos do que nos solos. Assim, aplicações sucessivas podem promover o acúmulo de metais pesados no ambiente e a entrada deles na cadeia alimentar (KIDD et al., 2007). Essas substâncias são tóxicas à microvida dos solos, às culturas que venham ser produzidas e aos consumidores desses produtos, ou seja, afetam de forma deletéria todos os níveis da cadeia trófica. Portanto, a utilização do lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais pode ser coibida pelo conteúdo desses metais (POGGERE et al., 2012). As resoluções CONAMA n° 375 e n° 380 estabelecem limites de concentração de metais pesados em solos condicionados por lodos, bem como a quantidade que pode ser acumulada no solo com a sua aplicação sucessiva (CONAMA, 2006).

Para Bettiol e Camargo (2000), a análise da composição química do lodo é indispensável para verificar se o resíduo atende aos teores estabelecidos pela norma nacional,

além de fornecer uma ideia do potencial para destinação na agricultura, seja como condicionador das propriedades químicas e biológicas do solo, ou como substituto, ao menos parcial, dos fertilizantes minerais comumente utilizados.

Além da composição química do lodo, outros fatores, como o potencial genético da variedade do vegetal a ser cultivado e a fertilidade do solo, contribuem para o sucesso da colheita sob esse tipo de manejo (GOMES; NASCIMENTO; BIONDO, 2007). Portanto, há a necessidade de ensaios regionais para definição de critérios para aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas.

2.4 Efeito do lodo de esgoto nos atributos químicos do solo

Nas regiões tropicais e subtropicais os solos são altamente intemperizados, ácidos e com baixas concentrações de matéria orgânica e nutrientes (BRADY; WEIL, 2013). No Brasil, os Latossolos são a ordem com maior representatividade geográfica e importância agrícola (EMBRAPA, 2006). Entretanto esses solos apresentam pequenas reservas de nutrientes para as plantas e a predominância de minerais de baixa capacidade de troca catiônica (CTC), SB e saturação por bases (V %) e, portanto, necessitam de manejo apropriado para se tornarem produtivos.

Além das causas naturais, as antropogênicas também podem degradar a qualidade dos solos. Uma dessas causas é a exaustão dos nutrientes devido à retirada pelas culturas em taxas maiores do que as adições via adubação. Além disso, há a degradação pela utilização de tecnologias inadequadas, a ausência de práticas conservacionistas e a destruição da cobertura vegetal e, em decorrência, ocorre a erosão, a lixiviação e a oxidação da matéria orgânica, agravando os problemas da baixa fertilidade dos solos tropicais (LOPES; GUILHERME, 2000).

O nível de fertilidade de um solo depende de sua capacidade de fornecer água e nutrientes para o desenvolvimento adequado das plantas, sendo influenciado pelas propriedades físicas, químicas e biológicas (CEZAR et al., 2012). É considerado que a fertilidade do solo corresponde a um dos principais fatores responsáveis pela produtividade das lavouras (BISCAIA; MIRANDA, 1996). Portanto, o lodo de esgoto incrementa o potencial produtivo do solo e a nutrição das plantas, tendo um papel fundamental na elevação da produtividade.

A matéria orgânica em quantidades suficientes no solo é fator decisivo para a manutenção do equilíbrio dos nutrientes (FERRER et al., 2011). Em solos adubados com lodo de esgoto, o aporte de matéria orgânica, altera o pH, a acidez total (H + Al), a SB, a CTC, a V % além da disponibilidade dos elementos químicos (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015). Praticamente, todos nutrientes presentes no lodo estão na forma orgânica e são liberados gradativamente ao solo a partir da sua mineralização. Essa propriedade permite que o solo seja conservado por mais tempo fertilizado, necessitando de uma menor reposição de nutrientes nas aplicações seguintes (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015).

O efeito do lodo de esgoto no pH do solo é um aspecto importante para sua utilização na agricultura. A aplicação do lodo de esgoto pode aumentar como diminuir seus valores, dependendo do tipo de tratamento que o resíduo recebeu, da taxa de frequência de aplicação do lodo e das propriedades do solo e dos processos metabólicos após aplicação (BOEIRA; LIGO; DYNIA, 2002). Quando tratado com calcário, o pH do material tende a se elevar (FERRER et al., 2011; BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015), por outro lado, a produção de ácidos orgânicos durante o processo de biodegradação da fração orgânica dos resíduos e a nitrificação podem contribuir para sua acidificação (BOEIRA; LIGO; DYNIA, 2002).

A fertilidade do solo é fortemente relacionada com o seu pH, uma vez que este interfere na forma e na mobilidade dos nutrientes e metais pesados em seu perfil e na quantidade desses elementos disponíveis para a planta (BAIRD; CANN, 2011). A disponibilidade e a utilização dos nutrientes vegetais no solo são profundamente afetadas pela sua acidez (ALVAREZ et al., 2008). Segundo Wallace e Wallace (1994), para que ocorra a redução da disponibilidade de Pb para as plantas é necessário que pH esteja acima de 6,5. Em estudos com nabo forrageiro, Andersson e Nilsson (1987) observaram que o aumento do pH provocou uma diminuição de cerca de 75 % do Ni absorvido pela planta.

A capacidade do solo de reter nutrientes e metais pesados é um fator para prever a produtividade da cultura e o impacto ambiental provocado pelo manejo (SCHIAVONI et al., 2011). O fenômeno de troca iônica é de grande importância para a gestão dos solos, seja na produção de alimentos, seja na utilização dos solos como receptores de resíduos. A matéria orgânica apresenta elevada CTC, em função de seu estado coloidal, com elevada superfície específica (COSTA et al., 2014). Conforme Oliveira et al. (2002), a aplicação de lodo de esgoto promoveu o aumento da CTC em um Latossolo distrófico cultivado com cana-de-açúcar.

A SB do solo é a soma dos teores de cátions permutáveis, exceto H^+ e Al^{+3} ($SB = Ca^{+2} + Mg^{+2} + K^+$) e indica o potencial nutricional dos solos. Os solos brasileiros geralmente

apresentam baixa SB, em virtude, principalmente, do reduzido teor de NH^{+4} (SILVA et al., 2001). Nascimento et al. (2004) observaram que a SB aumentou significativamente na camada de 0 - 0,20 m do solo, nas parcelas que receberam dosagens do composto de lodo de esgoto (EMBRAPA, 2006).

Os metais pesados presentes nos lodos de esgotos são transferidos para os solos e, assim, é necessário considerar o impacto potencial que a adoção dessa prática pode causar. De fato, a contaminação do solo por elementos tóxicos é uma forma de degradação ambiental devido, principalmente, à crescente contribuição antrópica, que pode afetar sua qualidade e a capacidade produtiva (MACÊDO; MORRIL, 2008). Entretanto, a disponibilidade de metais pesados no solo depende da forma química sob qual o metal se apresenta e das características do solo, como pH, teor de matéria orgânica, CTC e percentagem de argila (YUAN; LAVKULICH, 1997). Segundo Haruvy (1997), a capacidade atenuadora dos solos pode evitar que os metais sejam transferidos às plantas. Dessa forma, é necessário o estudo do movimento dos elementos químicos no solo e na planta e sua atividade no meio ambiente (NASCIMENTO et al., 2004).

2.5 Efeito do lodo de esgoto nas plantas

Para o desenvolvimento ideal, além de luz, água e temperatura, as plantas necessitam dos elementos minerais. Contudo, mesmo os solos com teores ótimos de nutrientes podem não refletir em um bom desenvolvimento das plantas, devido aos valores de pH, CTC, SB e V % que estão diretamente relacionados à mobilidade das substâncias do solo para as plantas (TSUTIYA, 2000). Por alterar o pH, os teores de macro e micronutrientes e a relação de íons trocáveis, CTC, SB e V %, o lodo de esgoto pode contribuir diretamente com o estado nutricional das plantas e consecutivamente no aumento da produtividade agrícola.

Os nutrientes presentes no lodo de esgoto estão em sua maioria na forma orgânica, e se tornam disponíveis para as plantas à medida que são mineralizados para forma inorgânica (MELO; MARQUES, 2000). Portanto, a fertilização a partir do lodo oferece maior estabilidade no fornecimento de nutrientes para as plantas ao longo do tempo, ao contrário da fertilização mineral, onde nutrientes estão prontamente disponíveis e logo são perdidos por processos de lixiviação e percolação. Oliveira et al. (2002) observaram a liberação gradativa de nutrientes pelo lodo, com uma disponibilidade contínua para as plantas, enquanto

praticamente todo o P adicionado, na forma de fosfato de sódio, foi imobilizado pelo solo após a aplicação.

O P é um dos nutrientes essenciais para as plantas, pois atua diretamente no processo de conversão de energia; fotossíntese, metabolismo de açúcares, armazenamento e transferência de energia, divisão celular e alargamento das células. O P também estimula o crescimento das raízes e aumenta a resistência às doenças. A cultura do milho não possui eficiência no aproveitamento desse nutriente, portanto, as doses recomendadas para aplicação nos solos são geralmente altas (EMBRAPA, 2006). O incremento de P nos solos, via lodo de esgoto, é importante devido à reduzida disponibilidade nos solos brasileiros, em decorrência da baixa difusão e da alta fixação nos solos (MALAVOLTA, 1989).

Depois do N, o K é o elemento absorvido em maiores quantidades pelo milho, sendo que 20 % são exportados para os grãos. As concentrações de K no lodo de esgoto são baixas. Entretanto, diferente do N e P, o K já se encontra na fase mineral, prontamente disponível para as plantas (CAMARGO; BETTIOL, 2010).

As plantas necessitam de baixos teores de micronutrientes, entretanto, a deficiência de um deles pode ter tanto efeito na desorganização de processos metabólicos, quanto a deficiência de um macronutriente, como N (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Os lodos de esgotos contêm níveis variáveis de micronutrientes (BARROS et al., 2011).

Os metais pesados transferidos para o solo e disponíveis para absorção pelas plantas podem reduzir a produtividade das culturas (WANG et al., 1994). O padrão de acúmulo de metais pesados em plantas cultivadas em solos adubados com lodo de esgoto inclui respostas negativas, positivas ou ausência de respostas (PAGE et al., 1987).

Segundo McBride (1995), os teores de metais nos tecidos das plantas dependem do pH do solo, da natureza do metal, do teor de matéria orgânica e da CTC. Além disso, o acúmulo de metais pesados é também muito variável de acordo com o vegetal e com os diferentes órgãos. As alfaces absorvem quantidades expressivas e os pepinos absorvem quantidades negligenciáveis de Pb (BAIRD; CANN, 2011). Segundo Jing e Logan (1992), os frutos acumulam menores quantidades de metais do que as partes vegetativas na maioria das plantas. Cantarella et al. (2003) observaram no milho uma maior acumulação de metais nas folhas, caules e raízes em oposição aos grãos e sabugos.

2.6 Cultura do milho

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, totalizando 78,98 milhões de toneladas na safra 2015/2016 (CONAB, 2016). O crescimento da produção é resultado do desenvolvimento do mercado, proporcionado pelas possibilidades do uso do milho como alimento humano e animal. Todavia, o nível médio nacional de produtividade do milho ainda é baixo, demonstrando ser fundamental a introdução e aperfeiçoamento de novas tecnologias para que alcance altas produtividades em sistemas de produção sustentáveis.

Das tecnologias disponíveis, a adubação tem sido considerada a mais limitante para o aumento de produtividade nas lavouras de milho. Entre os sistemas de manejo de adubação, o aproveitamento de resíduos orgânicos vem se mostrando promissor (EMBRAPA, 2006). Nesse contexto, o lodo de esgoto, em condições adequadas para a aplicação nos solos, pode ser um importante aliado na produção dessa cultura. O período de vegetação longo e as necessidades de N se adaptam ao período de mineralização da matéria orgânica do lodo de esgoto e à liberação dos nutrientes.

O uso do lodo de esgoto em culturas de milho provoca aumento da concentração de diversos nutrientes nas folhas das plantas (GOMES; NASCIMENTO; BIONDO, 2007). Barros et al. (2011) estudaram o cultivo de milho adubado com lodo e notaram o aumento de rendimento da matéria seca das plantas e dos teores dos macronutrientes na parte aérea das plantas. Do mesmo modo Simonete et al. (2003), avaliando o efeito da aplicação de lodo de esgoto na nutrição mineral em plantas de milho, verificaram o aumento do acúmulo de macronutrientes com a aplicação do resíduo.

O lodo de esgoto é uma alternativa para o incremento na produção de milho no Sul de Minas Gerais. O solo predominante, Latossolo Vermelho distrófico, é pobre e necessita de manejo com matéria orgânica. A ETE municipal de Paraguaçu não caracteriza o lodo gerado, que é destinado para o aterro sanitário da cidade, em desajuste com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), causando impactos não só a área municipal, como em todo Lago de Furnas e seu entorno. Portanto, são fundamentais os estudos para viabilizar o uso agrícola sustentável do lodo de esgoto, pelos produtores da região.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, V. F. C.; BOARETTO, A. E.; ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; TREVIZAM, A. R.; FERNANDES, H. M. G. - Alteraciones químicas y fitodisponibilidad de níquel en suelo tratado con lodo albañal. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 990-997, 2008.
- ANDERSSON, A.; NILSSON, K. O. Influence on the levels of heavy metals in soil and plant sewage sludge used as fertilizer. **Swedish Journal of Agricultural Research**, Estocolmo, v. 6, n. 1, p. 151-159, 1976.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química Ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844p.
- BARROS, I. T.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Avaliação agronômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 630-638, 2011.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; ANDRADE, NETO, C. O.; VON SPERLING, M. **Utilização de esgotos tratados em irrigação: aspectos sanitários. In: Bastos RKK (Org.). Utilização de esgotos tratados em fertirrigação, hidroponia e psicultura**. 1. ed. São Carlos: RiMa Artes e Texto, 2003. 37p.
- BERTOLI, A. C.; CARVALHO, R.; CANNATA, M. G.; BASTOS, A. R. R.; AUGUSTO, A. S. Toxidez do chumbo no teor e translocação de nutrientes em tomateiro, **Biotemas**, v. 24, n. 4, p. 7-15, 2011.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. 2. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312p.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, A. O. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: 1. ed. Embrapa Meio Ambiente, 2006. 320p.
- BISCAIA, R. C. M.; MIRANDA, G. M. Uso de lodo de esgoto calado na produção de milho. **Sanare**, Sobral, v. 5, n. 1, p. 86-89, 1996.
- BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1639-1647, 2002.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 388–393, 2015.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3. ed. Porto Alegre: Buokman, 2013. 686p.

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 na oxisol treated with successive applications of sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 1461-1470, 2011.

BRASIL - Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 11 jul. 2014.

CAMARGO, O. A.; BETTIOL, W. **De resíduo a fertilizante: Uma análise prospectiva do meio ambiente**. In: COSCIONE, A.R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M., orgs. Uso agrícola de lodo de esgoto: Avaliação após a resolução no. 375 do Conama. Botucatu, FEPAF, 2010. p. 13-30.

CANTARELLA, H.; MATTOS JÚNIOR, D.; QUAGGIO, J. A.; RIGOLIN, A. T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Berlin, v. 67, n. 1, p. 215-223, 2003.

CARVALHO, C. S.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A. de; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. M. M. Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 3, p. 413-419, 2015.

CASTRO, A. L. F. G. de; SILVA, O. R. da; SCALIZE, P. S. Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. **Multi-Science Journal**, Goiás, v. 1, n. 2, p. 66-73, 2015.

CEZAR, R.; SILVA, M.; COLONESE, J.; BIDONE, E.; EGLER, S.; CASTILHOS, Z.; POLIVANOV, H. Influence of the properties of tropical soils in the toxicity and bioavailability of heavy metals in sewage sludge-amended lands. **Environmental Earth Science**, v. 66, p. 2281-2292, 2012.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2014/2015**, sétimo levantamento, v. 2, n. 7, 2015. 105p. Disponível: <http://www.conab.gov.br/acessoabr> Acesso em 10 de maio de 2015.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resoluções nº 375 e nº 380, de 29 de agosto de 2006**. Disponível: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res06/res37506.pdf>>. Acessado: 01 Julho 2014.

CORCORAN, E., NELLEMAN, C.; BAKER, E.; BOS, R.; OSBORN, D.; SAVELLI, H. **Sick Water?: the central role of wastewater management in sustainable development**. Arendal: Um Habitat, Grid, 2010. 85p.

COSTA, V. L.; MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A.; GREGO, C. R.; MELO, L. C. A. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p.287-293, 2014.

DYNIA, J. F.; SOUZA, M. D.; BOEIRA, R. C. Lixiviação de nitrato em Latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 855-862, 2006.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

ESCUDEY, M.; MORAGA, N.; ZAMBRA, C.; ANTILÉN, M. Sewage sludge disposal and applications: self-heating and spontaneous combustion of compost piles - trace metals leaching involcanic soils after sewage sludge disposal. **Waste Water - Evaluation and Management**, v. 1, n. 1, p. 399-430, 2011.

FAVARETTO, N.; DESCHAMPS, C.; DAROS, E.; PISSAIA, A. Efeito do lodo de esgoto na fertilidade do solo e no crescimento e produtividade de milho (*Zea mays* L.). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 837-847, 1997.

FERRER, A.; OÑA, J. DE; OSORIO, F.; MOCHÓN, I. Evolution of the Soil and Vegetation Cover on Road Embankments after the Application of Sewage Sludge. **Water, Air, & Soil Pollution**. Amsterdam, v. 214, n. 1, p. 231–240, 2011.

FJALLBORG, B.; AHLBERG, G.; NILSSON, E.; DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, Amsterdam, v. 31, n. 1, p. 25-31, 2005.

GARCÍA-DELGADO, M.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S.; LORENZO, L. F.; ARIENZO, M.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J. Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludges from different wastewater treatment plants. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 382, n. 1, p. 82-92, 2007.

GOMES, S. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDO, 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, 2007.

HARUVY, N. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 133-119, 1997.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA)**, 2013. Disponível: <www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela>.

JING J.; LOGAN J. T. Effects of sewage sludge cadmium concentration on chemical extractability and plant uptake. **Journal of Environmental Quality**, Amsterdam, v. 21 n. 1 p. 73-81, 1992.

JUNIO, G. R. Z.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; SANTOS, G. B.; SANTOS, L. D. T.; FERNANDES, L. A. Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 7, p. 706-712, 2013.

KIDD, P. S.; DOMÍNGUEZ M. J.; RODRÍGUEZ B. J.; DÍEZ B. C.; MONTERROSO B. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 66, n.1, p. 1458–1467, 2007.

LOBO, T. F.; FILHO, H. G.; BULL, L. T.; KUMMER, A. C. B. Efeito do lodo de esgoto e do nitrogênio nos fatores produtivos do girassol. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 504–509, 2013.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: LÓPEZ-MOSQUERA, M.E.; MOIRÓN, C.; CARRAL, E. Use of dairy industry sludge as fertilizer for grasslands in northwest Spain: heavy metal level in the soil and plant. **Resource, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 30, p. 95-109, 2000.

MACÊDO, L. S.; MORRIL, W. B. B. Origem e comportamento dos metais fitotóxicos: Revisão de literatura. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**. João Pessoa, v. 2, n. 2, p. 29-38, 2008.

MACEDO, F. G.; MELO, W. J.; MERLINO, L. C. S.; TORRES, L. S.; GUEDES, A. C. T.; MELO, G. M. P.; CAMACHO, M. A. Lodo de esgoto como fonte de nitrogênio: concentração no perfil do solo e em plantas de milho. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 3, p. 263-268, 2012.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1989. 292p.

MANGIERI, V. R. L; TAVARES FILHO, J. Disposição de resíduos sólidos no solo: efeito nos atributos físicos, químicos e na matéria orgânica. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 747-763, 2015.

MAZIVIERO, G. T. Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas – teste allium cepa e tradescantia pallida. 2011. 106f. Dissertação (Mestrado em Biologia Celular e Molecular) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

McBRIDE, M. B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? **Journal of Environmental Quality**, Amsterdam v. 24, n. 1, p. 5-18, 1995.

MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: Bettiol, W.; Camargo, O.A. (eds.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p. 109-141. 2000.

MOREIRA, R. S ; MINCATO, R. L.; SANTOS, B. R. Heavy metals availability and soil fertility after land application of sewage sludge on dystroferric Red Latosol. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 6, p. 512-520, 2013.

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, 2004.

NAKAMURA, C. Y.; MARQUES, E.; VILELA, P.; ODA, T.; LIMA, L.; COSTA, R. Avaliação da qualidade da água subterrânea no entorno de um aterro sanitário. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 2. p. 28-40, 2014.

NUVOLARI, A.; TELLES, D. D.; RIBEIRO, J. T.; MIYASHITA, N. J.; RODRIGUES, R. B.; ARAUJO, R. de; MARTINELL, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**, 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 565p.

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. 2, p. 505-520, 2002.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 2005. 574p.

PAGE, A. L.; LOGAN, T. J.; RYAN, J. A. **Land application of sludge-food chain implications**. 1. ed. Chelsea: Lewis Publishers, 1987. 168p.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto - Uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 1, p. 89-188, 2010.

PEQUENO, P. L. L.; MENDES, J. R. N.; SCHELINDWEIN, J. A.; SERRADO, A.; LOCATELLI, M. Caracterização Química do lodo de esgoto tratado (biossólido) para uso agrícola e florestal no Estado de Rondônia. **SEPEX - UNIR**, Porto Velho, v. 11, n. 2, p. 08-12, 2008.

POGGERE, C. G.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A.C.V.; BITTENCOURT, S.; DALPISOL, M.; ANDREOLI, C.V. Lodos de esgoto alcalinizados em solos do estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. **Revista Brasileira Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 4, p. 429-438, 2012.

SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tratamento de Esgotos**. 2008. Disponível: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>. Acessado em: 3 de setembro de 2013

SCHIAVONI, E. A.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; COSTA, F. G. Influence of organic-mineral fertilization of an oxisol on soil chemical properties and *Bracharia brizantha* production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2219-2226, 2011.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEIXE, C. A.; BERNARDES, E. M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 36, n. 5, p. 831-840, 2001.

SILVA, W. T. P.; SOUZA, M. A. A. Modelo para o combate a crises de abastecimento urbano de água. **Paranoá**, Brasília, n. 10, p. 95-104, 2013.

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. 1187-1195, 2003.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA, cap. 4, 2000. 37p.

TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2002. 42p.

VIEIRA, C. L. Distrito Federal transforma em fertilizante 400 toneladas diárias de lodo de esgoto. Disponível:<<http://www.agenciabrasil.gov.br/noticias/2007/04/12/materia.2007-...>>. Acesso em: 06 julho. 2010.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Lodos ativados**. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2012. 240 p.

WALLACE, A.; WALLACE, G. A. A possible flaw in EPA'S 1993 new sludge rule due to heavy metal interaction. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Londres, v. 25, n. 1, p. 129-135, 1994.

WANG, Q. R.; CUI, Y. S.; LIU, X. M.; DONG, Y. T.; CHRISTIE, P. Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. **Journal of Chemical Education**. Nova Iorque, v. 8, n. 1, p. 496-500, 1994.

YUAN, G.; LAVKULICH, L. M. Sorption behavior of copper, zinc, and cadmium in response to simulated changes in soil properties. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 28, n. 1, p. 571-587, 1997.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO I: Atributos químicos de um Latossolo Vermelho após aplicação de lodo de esgoto.

AUTORES: Rômulo Spuri Barbosa, Breno Régis Santos, Douglas José Marques, Eric Batista Ferreira, Ronaldo Luiz Mincato.

Artigo submetido à Revista de Engenharia Agrícola (Jaboticabal)

ARTIGO II: Efeito do lodo de esgoto na produtividade do milho

AUTORES: Rômulo Spuri Barbosa, Breno Régis Santos, Douglas José Marques, Eric Batista Ferreira, Marcio Donizetti de Andrade, Ronaldo Luiz Mincato.

Artigo redigido conforme normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

ARTIGO I**Atributos químicos de um Latossolo Vermelho após aplicação de lodo de esgoto.**

AUTORES: Rômulo Spuri Barbosa, Breno Régis Santos, Douglas José Marques, Eric Batista Ferreira, Ronaldo Luiz Mincato.

Artigo submetido à **Revista de Engenharia Agrícola (Jaboticabal)**

Atributos químicos de um Latossolo Vermelho após tratamento com lodo de esgoto

Rômulo Spuri Barbosa⁽¹⁾, Breno Régis Santos⁽²⁾, Eric Batista Ferreira⁽³⁾, Douglas José Marques⁽⁴⁾, Ronaldo Luiz Mincato^{(5)*}

- (1) Biólogo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, romulospuri@hotmail.com
- (2) Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, brenors@yahoo.com.br
- (3) Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências Exatas, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, ericbferreira@gmail.com
- (4) Engenheiro Agrônomo, Universidade José do Rosário Vellano, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências Agrárias, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, douglasjmarques81@yahoo.com.br
- (5) Geólogo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, ronaldomincato@gmail.com

* Autor correspondente (35) 32991419

RESUMO: Os solos tropicais apresentam, em geral, baixa fertilidade natural e o manejo inadequado resulta no aumento das áreas degradadas e na diminuição da produtividade das culturas agrícolas. O lodo de esgoto, devido aos elevados teores de matéria orgânica e de nutrientes, pode melhorar as propriedades dos solos, como, por exemplo, incrementar a capacidade de troca catiônica e a soma de bases que influenciam na mobilidade e a disponibilidade dos elementos no solo. Assim, foram avaliadas as propriedades químicas de um Latossolo Vermelho do sul de Minas Gerais após 30 e 150 dias de incubação do lodo no solo, a partir de doses crescentes do lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgoto de Paraguaçu - MG. Assim, o experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado com seis repetições por pote, com a aplicação de lodos de esgotos nas concentrações de 10, 20, 40, 80, 160 Mg ha⁻¹. A análise de variância das doses crescentes de lodo apontou variação significativa nos teores de P, Ca, Mg, Zn, S, soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases entre os tratamentos. A dose de 160 Mg ha⁻¹ de lodo promoveu a melhor fertilização do solo a 5 % de significância.

PALAVRAS-CHAVE: biossólidos, destinação de lodos de esgotos, fertilidade do solo.

ABSTRACT: In general, tropical soils have low natural fertility and the inadequate management results in the increase of degraded areas and decreased productivity of agricultural crops. The sewage sludge, due to high levels of organic matter and nutrients, can improve the properties of soils, for example, by increasing the cationic exchange capacity and the sum of the bases that influence on mobility and the availability of the elements in the soil. Then, the chemical properties of a Red Latosol of southern Minas Gerais were evaluated after 30 and 150 days of incubation of sludge in soil, from increasing doses of sewage sludge of the sewage treatment plant of Paraguaçu - MG. Therefore, the experiment was carried out in completely randomized design with six repetitions per pot, with the application of sewage sludge at concentrations of 10, 20, 40, 80, 160 Mg ha⁻¹. The variance analysis of increasing doses of sludge pointed out significant variation in levels of P, Ca, Mg, Zn, S, sum of bases, cationic exchange capacity and bases saturation among the treatments. The dose of 160 Mg ha⁻¹ of sludge promoted the best soil fertilization at 5% of significance

KEYWORDS: biosolids, sewage sludge destination, soil fertility.

INTRODUÇÃO

Nas regiões tropicais e subtropicais os solos são altamente intemperizados, ácidos e com baixas concentrações de matéria orgânica e de nutrientes. No Brasil, os Latossolos são a ordem com maior representatividade geográfica e importância agrícola (EMBRAPA, 2013). Todavia, tais solos apresentam pequenas reservas de nutrientes para as plantas e, em geral, apresentam baixas capacidade de troca catiônica (CTC) e de soma de bases (SB).

Além das causas naturais, as antropogênicas também podem degradar a qualidade dos solos. Uma das causas é a exaustão dos nutrientes devido à sua retirada pelas culturas agrícolas em taxas maiores do que as reposições via adubação (GUIMARÃES et al., 2015). Além disso, há a degradação pela utilização de práticas agrícolas inadequadas, pela ausência de práticas conservacionistas e pela retirada da cobertura vegetal, que resulta em erosão, lixiviação e oxidação da matéria orgânica, agravando os problemas dos Latossolos (NEEDELMAN, 2013).

O lodo de esgoto, resíduo gerado nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), tem sido utilizado há muito tempo na agricultura em vários países. Entretanto, no Brasil é uma prática pouco usada, apesar de trabalhos experimentais já terem demonstrado seu efeito na produtividade das culturas, devido seu potencial condicionador e fertilizador dos solos (MOREIRA et al., 2013). Entre os benefícios que proporcionam aos solos estão a elevação do pH, a redução da acidez potencial (BONINI et al., 2015 a), o aumento da disponibilidade dos nutrientes N, P, K, Ca, S, Mg, Zn e Mn e de íons trocáveis da SB, da CTC e da saturação por bases (V %), (ROMEIRO et al., 2014).

A incorporação dos lodos nos solos é uma das alternativas mais viáveis econômica e ambientalmente, pois promove a reciclagem dos nutrientes, da energia e da matéria orgânica (BUENO et al., 2011) e contribui para economizar recursos naturais e energia elétrica utilizados na fabricação de fertilizantes minerais (QUINTANA et al., 2011). Porém, os lodos

podem conter substâncias tóxicas que, em elevadas concentrações, podem contaminar os solos, os recursos hídricos e a cadeia trófica (ESCUDEY et al., 2011). No Brasil, os teores máximos de metais pesados e as quantidades que podem ser acumuladas nos solos são definidos pelas Resoluções CONAMA 375 e 380 (CONAMA, 2006).

A elevada variabilidade composicional existente nos lodos e nos solos demandam ensaios regionais para definição de critérios para aplicação dos lodos em solos agrícolas (HECK et al., 2013). O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho após 30 e 150 dias de incubação do lodo no solo, a partir de doses crescentes de lodo de esgoto da ETE do Município de Paraguaçu, Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Alfenas – Unidade Educacional I, em Alfenas, Minas Gerais. O Latossolo Vermelho utilizado no experimento foi coletado em uma área que não recebe adubação há 15 anos, localizada a 21° 25' de latitude sul e 45° 57' de longitude a oeste de Greenwich e altitude de 880 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é o tropical mesotérmico ou tropical de altitude, com médias anuais variáveis de 21 a 23° C e pluviosidade de 1.500 mm anuais (SPAROVEK et al., 2007).

O solo foi seco ao ar e à sombra, homogeneizado, peneirado, quarteado e separada uma alíquota para caracterização química no Laboratório de Análises Químicas “João Carlos Pedreira de Freitas” da COOXUPÉ, em Guaxupé – MG. O pH foi determinado em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} . O carbono total e matéria orgânica após extração, pelo método do bloco digestor e foram determinados por titulometria e o P foi extraído com resina trocadora de íons e quantificado por Espectroscopia UV/Visível. Os elementos Ca, Mg, Al e K trocáveis foram extraídos por NH_4Cl 1 mol L^{-1} ; o S método pelo BaCl_2 em pó; o B pelo BaCl_2 a quente com

microondas; o Cu, Fe, Mn e Zn, extraídos por DTPA-TEA (LINDSAY & NORVELL, 1978) e os metais pesados Cd, Pb, Mo e Ni, após digestão com água-régia, foram quantificados por Espectroscopia de Emissão com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). A soma H + Al foi determinada pelo método da solução tampão SMP a pH 7,0. Os valores de SB, V % e CTC potencial foram calculadas a partir dos teores de K, Ca, Mg e H + Al. O pH e V % e os teores de Ca e Mg no solo apontaram a não necessidade de calagem. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento.

Componente	Concentração
pH	5,70
Matéria Orgânica (g dm ⁻³)	31,00
Carbono total (g dm ⁻³)	18,00
Potássio (mg dm ⁻³)	6,90
Fósforo (mg dm ⁻³)	35,00
Cálcio (mmol _c dm ⁻³)	41,00
Magnésio (mmol _c dm ⁻³)	20,00
Potássio (mg dm ⁻³)	6,90
Manganês (mg kg ⁻¹)	9,10
Zinco (mg kg ⁻¹)	2,10
Enxofre (mg kg ⁻¹)	32,45
Boro (mg kg ⁻¹)	0,24
Cobre (mg kg ⁻¹)	134,67
Chumbo (mg dm ⁻³)	0,80
Níquel (mg dm ⁻³)	0,20
Cromo (mg dm ⁻³)	0,02
H + Al (mmol _c dm ⁻³)	23,00
SB (mmol _c dm ⁻³)	67,90
CTC (mmol _c dm ⁻³)	90,90
V (%)	75,00

O lodo de esgoto utilizado foi obtido na Estação de Tratamento de Esgotos de Paraguaçu, em Minas Gerais. A coleta ocorreu em setembro de 2014, quando os 3 tanques de secagem da ETE estavam cheios. Foram coletadas 9 amostras, 3 por tanque, equidistantes e do topo até a base do tanque. Para os ensaios físicos e químicos as amostras foram secas em estufa durante 3 dias a 65° C, moídas, quarteadas e encaminhadas para o Laboratório de

Análises Químicas da COOXUPÉ, para realização dos ensaios físicos e químicos conforme MALAVOLTA et al. (2002). Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química do lodo de esgoto utilizado no experimento.

Componente	Concentração*
pH	7,20
Fósforo (g kg ⁻¹)	6,55
Potássio (g kg ⁻¹)	0,41
Enxofre (g kg ⁻¹)	11,02
Magnésio (g kg ⁻¹)	4,32
Cálcio (g kg ⁻¹)	40,51
Boro (mg kg ⁻¹)	119,89
Zinco (mg kg ⁻¹)	861,15
Manganês (mg kg ⁻¹)	243,45
Níquel (mg kg ⁻¹)	16,54
Chumbo (mg kg ⁻¹)	46,16
Molibdênio (mg kg ⁻¹)	1,50
Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,50
Cromo (mg kg ⁻¹)	83,46
Cobre (mg kg ⁻¹)	134,67

*Média das 9 amostras retiradas dos leitos de secagem

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado com unidades experimentais compostas por potes de 25 dm³, num arranjo de 5 tratamentos e 6 repetições, totalizando 30 unidades experimentais. Cada pote recebeu 25 kg de amostra composta de solo seco ao ar, peneirado em malha 2 mm, misturado e homogeneizado com, respectivamente, 125, 250, 500, 1000 e 2000 g de lodo de esgoto, correspondendo, respectivamente, a 10, 20, 40, 80 e 160 Mg ha⁻¹ (base seca). A densidade do solo foi considerada 1 g cm⁻³. As doses de lodo foram definidas a partir de valores crescentes da dose de biossólido considerada adequada (10 Mg ha⁻¹), conforme a Resolução n° 375 do CONAMA (CONAMA, 2006).

Os potes foram lentamente saturados por fluxo vertical ascendente de água, até atingir a capacidade de campo (CASAROLI & LIER, 2008), que foram monitorados e mantidos durante os 150 dias do experimento. Assim, para avaliar o efeito da aplicação de lodo no solo após 30 dias de incubação foi coletada em cada tratamento uma amostra representativa de cada pote, que foram misturadas e homogeneizadas, gerando amostra composta, para

determinação, no Laboratório de Análises Químicas da COOXUPÉ, dos mesmos parâmetros pelos mesmos procedimentos analíticos adotados na caracterização do solo inicial.

O efeito da aplicação de lodo nos diferentes tratamentos foi avaliado pela análise de uma amostra de solo por pote ou unidade experimental, após 150 dias. As amostras foram analisadas para os mesmos parâmetros e pelos mesmos procedimentos analíticos adotados na caracterização inicial do solo, no Laboratório de Análises Químicas da COOXUPÉ.

Os resultados após 150 dias da incorporação do lodo ao solo foram submetidos à análise de variância (ANAVA) seguida de Teste de Tukey e ajuste de modelos de regressão, de acordo com a natureza dos tratamentos. Nos testes, foi considerado o nível de 5 % de significância. As análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre os teores de metais pesados dos lodos da ETE de Paraguaçu – MG, com os limites definidos pela Resolução n° 375 do CONAMA (CONAMA, 2006) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Comparação entre os teores de metais pesados do lodo da ETE de Paraguaçu, MG, com os limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA 375 e 380 (CONAMA, 2006).

Elemento	Lodo*	CONAMA
	mg dm ⁻³	
Cádmio	0,50	39,00
Chumbo	46,16	300,00
Níquel	16,54	420,00
Cromo	83,46	1000,00
Cobre	134,67	1500,00
Zinco	861,15	2800,00
Molibdênio	1,50	50,00

*Médias das 9 amostras retiradas dos leitos de secagem

Todos os metais apresentaram concentrações menores do que os limites máximos legais, demonstrando que os teores desses elementos não impedem a aplicação do lodo em solos agrícolas e, portanto, não representam perigo à cadeia trófica.

Os resultados analíticos das amostras do solo incubado com o lodo de esgoto em relação ao solo inicial são listados na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização química do Latossolo Vermelho antes da aplicação do lodo de esgoto e após 30 dias de incubação com lodo de esgoto nos diferentes tratamentos adotados.

Elemento	Solo inicial	Solo + LE				
		T1	T2	T3	T4	T5
pH	5,70	5,58	5,68	5,43	5,71	5,73
Matéria Orgânica (g dm ⁻³)	31,00	37,64	48,35	41,59	47,22	41,35
Carbono Total (g dm ⁻³)	18,00	21,00	27,00	24,00	27,00	23,00
Fósforo (mg dm ⁻³)	35,00	49,15	35,59	39,75	47,59	47,35
Potássio (mmol _c dm ⁻³)	6,90	7,12	7,07	6,44	6,82	4,11
Cálcio (mmol _c dm ⁻³)	41,00	42,49	47,11	48,14	58,42	77,44
Enxofre (mg dm ⁻³)	9,00	57,74	69,16	93,81	166,21	282,85
Magnésio (mmol _c dm ⁻³)	20,00	17,24	18,66	18,32	20,39	20,67
Zinco (mg dm ⁻³)	2,10	2,49	2,91	3,70	4,59	6,97
Níquel (mg kg ⁻¹)	0,21	0,18	0,18	0,18	0,20	0,21
Chumbo (mg kg ⁻¹)	0,80	0,89	0,74	0,81	0,69	0,79
Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,50	0,51	0,50	0,48	0,52	0,49
Cromo (mg kg ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
H + Al (mmol _c dm ⁻³)	24,00	25,00	26,00	28,00	21,00	25,00
SB (mmol _c dm ⁻³)	67,90	66,85	72,84	72,90	85,63	102,22
CTC (mmol _c dm ⁻³)	90,90	91,85	98,84	100,90	106,63	126,22
V (%)	75,00	72,78	73,30	72,25	80,31	80,99

LE: lodo de esgoto; H + Al: acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; T1 = 10 Mg ha⁻¹; T2 = 20 Mg ha⁻¹; T3 = 40 Mg ha⁻¹; T4 = 80 Mg ha⁻¹; T5 = 160 Mg ha⁻¹

A Tabela 4 ilustra que o lodo de esgoto aumentou os teores de matéria orgânica, Ca, CTC, SB, V %, carbono total, P, Zn, e S do solo, em todos os tratamentos. Exceto para o V % em T1, T2 e T3 e para a SB em T1, porém com diferenças pouco significativas. Os valores de pH, dos micronutrientes K e Mg e dos metais pesados, Pb, Cd, Ni e Cr, se mantiveram praticamente constantes e com pequenas oscilações não significativas em relação ao solo inicial, o que pode ser explicado pelas baixas concentrações no lodo. Resultados semelhantes foram encontrados em outras classes de solos por NASCIMENTO et al. (2013), COSTA et al. (2014) e BONINI et al. (2015 b).

A incorporação de matéria orgânica é um dos benefícios do uso agrícola dos resíduos orgânicos, devido à contribuição para a melhoria nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (FERRER et al., 2011). Todas as doses de lodo de esgoto promoveram, com pequenas variações, o aumento do teor da matéria orgânica no Latossolo Vermelho (Tabela 4). Tal aporte é importante para os solos de regiões tropicais, naturalmente pobres em matéria orgânica. O aumento no teor de matéria orgânica foi observado também por BONINI et al. (2015 a), que estudaram influência do lodo de esgoto na recuperação de atributos

químicos de um Latossolo Vermelho degradado pelo cultivo de eucalipto e braquiária durante quatro anos.

A contribuição da matéria orgânica adicionada ao solo é observada também pela capacidade de reterem Ca^{+2} , Mg^{+2} , $(\text{H} + \text{K}^+, \text{Al})$ e, em alguns casos, Na^+ , elevando a CTC, SB e V % do solo (FERRER et al., 2011), devido à superfície das partículas da matéria orgânica conter cargas negativas capazes de reterem cátions. Quanto maior a concentração de lodo nos tratamentos, maiores os teores de Ca observados, também verificado por RICCI et al. (2010) usando 80 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto em Latossolo Vermelho-Amarelo. Já, os conteúdos de Mg e de K não foram afetados pela adição de lodos de esgotos aos solos, devido aos seus baixos teores no biossólido. O K, devido à elevada hidrossolubilidade, é em grande parte lixiviado nos leitos de secagem na ETE, tornando os lodos pobres em K (PAGLIA et al., 2007). Logo, para uso agrícola dos lodos de esgotos de Paraguaçu – MG é necessário adubação corretiva com fertilizante potássico. Os teores de $(\text{H} + \text{Al})$ praticamente não interferiam na composição dos tratamentos em relação ao solo inicial.

A CTC e a SB aumentaram continuamente com o aumento das doses de lodo de esgoto. Valores elevados de CTC e SB favorecem a liberação de nutrientes no solo, tornando-os disponíveis para as plantas (FERRER et al., 2011). A saturação por bases (V %) já elevada no solo inicial, só foi incrementada nos tratamentos com maiores doses, acompanhando o crescimento significativo da SB. Uma explicação adicional é que o lodo utilizado no experimento foi tratado com CaO na ETE e, portanto, nas maiores doses, foram acrescentadas maiores concentrações de Ca. De qualquer forma, a disposição de lodos de esgotos nos solos tropicais e subtropicais, favorece a manutenção da fertilidade do solo e a disponibilidade de íons trocáveis (BONINI et al., 2015 b).

O manejo do solo com lodo de esgoto proporciona aumento do carbono total, contribuindo para a melhoria da fertilidade química e dos atributos físicos do solo,

promovendo uma maior porosidade, infiltração e agregação (MATIAS et al., 2012). Os teores de carbono total no solo incubado acompanham o incremento da matéria orgânica pelo lodo de esgoto adicionado.

De acordo com BETTIOL & GHINI (2011), ainda há dúvidas quanto ao potencial do lodo em aumentar a disponibilidade de P no solo. No entanto, neste experimento foi observado o aumento de seus teores em todas as doses aplicadas, concordando com COSTA et al. (2014), que notaram aumento de P após 30 dias de adubação de Latossolo Vermelho eutroférico com lodo de esgoto.

Com relação ao S, houve um aumento expressivo no solo com a aplicação do lodo de esgoto, proporcional a concentração de lodo aplicada, que variou de 57,74 a 282,85 mg dm⁻³ (Tabela 4). Essa diferença se deve ao elevado teor (11,02 g dm⁻³) do nutriente no resíduo e à baixa concentração no solo inicial. De acordo com RHEINHEIMER et al. (2005), solos com baixos teores de matéria orgânica podem apresentar baixa disponibilidade de S, limitando o desenvolvimento vegetal. Como os solos brasileiros, de maneira geral, possuem baixos teores de matéria orgânica, a adição de resíduos de elevado teor orgânico, como o lodo de esgoto, pode ser importante para o fornecimento de S. De acordo com SÍGOLO & PINHEIRO (2010), a fonte de S nos lodos de esgotos é atribuída à decomposição de proteínas das fezes humanas, à presença de surfactantes e ao S resultante da queima de combustíveis fósseis.

O teor de Zn disponível no solo também aumentou com a aplicação de todas as doses de lodo de esgoto e, no tratamento com menor dose (T1), já atingiu uma concentração considerada muito boa / elevada por RIBEIRO et al. (1999). Todavia, teores dos metais pesados Ni, Pb, Cd e Cr no solo inicial e nos tratamentos não apresentaram variação, o que reflete os seus baixos teores no lodo de esgoto (Tabela 4).

Após 150 dias de incorporação do lodo de esgoto no Latossolo Vermelho, os teores de P, Ca, Mg, Zn, S, SB, CTC e V %, com significância de 5 %, aumentaram conforme a elevação da dose de lodo (Figura 1A a 1H).

De acordo com BONINI et al. (2015 a), a aplicação do lodo incorpora teores significativos de macronutrientes no solo. Do tratamento com menor concentração de lodo para aquele com a maior, o P aumentou de forma linear de 12,88 a 34,51 mg dm⁻³ (Figura 1A), em que o nível de suficiência de P no solo foi de baixo para muito bom (RIBEIRO et al., 1999). As concentrações de Ca aumentaram de 43,90 a 95,40 mmol_c dm⁻³ e do Mg de 16,51 a 23,56 mmol_c dm⁻³ (Figuras 1B e 1C). Já, os teores de S cresceram de 22,11 a 290,42 mg dm⁻³ (Figura 1E). Houve, portanto, um aumento significativo nos teores desses nutrientes no solo à medida que se elevou a proporção de lodo aplicado. Logo, o lodo de esgoto demonstrou potencial para contribuir diretamente no desenvolvimento vegetal, sendo que a dose de 160 Mg ha⁻¹ é a que melhor disponibiliza esses elementos, naturalmente pobres na maioria dos solos tropicais (RIBEIRO et al., 1999).

A análise de variância para os incrementos na CTC, SB e V % mostrou variação diferenciada nos tratamentos entre as doses de lodo aplicadas. Houve um crescimento linear na CTC da menor para a maior dose de lodo, respectivamente de 86,05 e 137,56 mmol_c dm⁻³ (Figura 1G). A SB e V % também tiveram crescimento linear positivo, respectivamente, de 65,22 e 75,76 para 121,89 mmol_c dm⁻³ e 88,44 % (Figuras 1F e 1H). Portanto, o tratamento com 160 Mg ha⁻¹ proporcionou o melhor efeito na CTC, SB e V % do solo, ou seja, apresentou maior potencial para manutenção da fertilidade, para a retenção de água e redução dos efeitos tóxicos pela aplicação de fertilizantes (RIBEIRINHO et al., 2012). Tais acréscimos podem representar um ganho para os solos tropicais, de baixa CTC e pobres em matéria orgânica, com economia de recursos naturais.

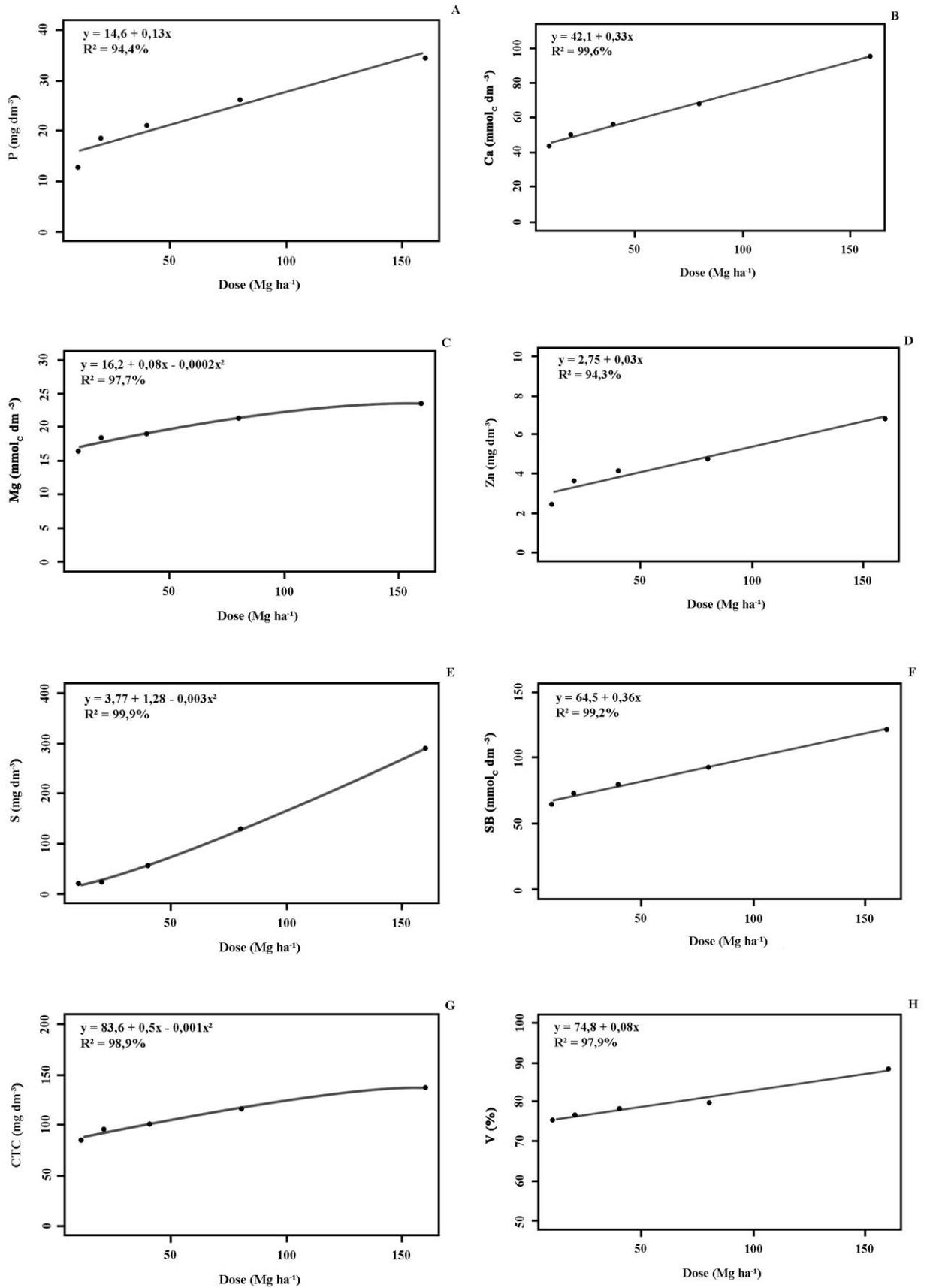


Figura 1: Variação dos teores de P (A), Ca (B), Mg (C) Zn (D) e S (E) e dos valores de SB (F), CTC (G) e V % (H) com o aumento das doses de lodo após 150 dias da incorporação ao solo.

Experimento realizado por MOREIRA et al. (2013) em um Latossolo Vermelho distrófico, cultivado com alface em casa de vegetação, também apontou aumento da CTC com o aumento da dose de lodo de esgoto. Acréscimos na SB foram registrados por BONINI et al. (2015 a) que, estudaram a recuperação de áreas degradadas com adição de lodo de esgoto e constataram aumento da SB com a elevação das doses de lodo.

Os teores de Zn no solo aumentaram com o aumento das doses de lodos (Figura 1D). Aumentos nos teores de Zn foram verificados também por RICCI et al. (2010) no tratamento com 80 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto.

Já, o pH, B, Mn e H + Al também apresentaram diferença estatística a 5 % entre os tratamentos, porém sem aumentos proporcionais às doses aplicadas (Figura 2A a 2D).

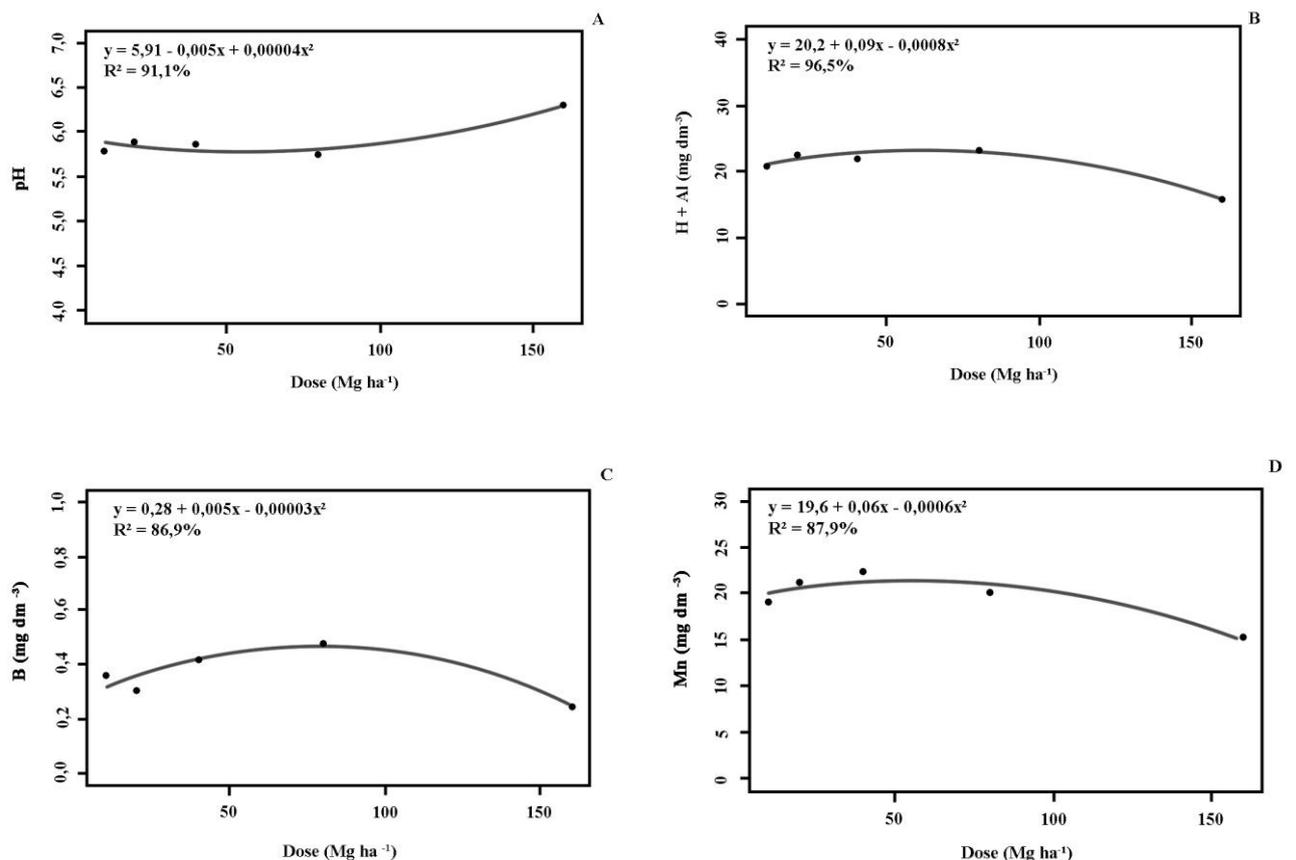


Figura 2: Variação do pH (A), H + Al (B), B (C) e Mn (D) com o aumento das doses de lodo de esgoto após 150 dias da incorporação do lodo ao solo.

O lodo de esgoto diminuiu a acidez do Latossolo Vermelho (pH de 5,7 a 6,3) (Figura 2A), com a mudança de classe na dose mais alta (160 Mg ha⁻¹), em que o solo passou da acidez média para fraca (RIBEIRO et al., 1999). Tal efeito é devido, provavelmente, à maior concentração de CaO na dose máxima de lodo, que é usualmente adicionado para estabilização dos lodos na ETE de Paraguaçu - MG. Houve ainda a redução da acidez potencial (23 a 15,83 mmol_c dm⁻³) (Figura 2B). No caso, ocorreu uma diminuição do valor de H + Al com o aumento das doses de lodo, sendo que todos tratamentos ficaram com acidez potencial muito baixa / baixa (RIBEIRO et al., 1999).

Os micronutrientes são elementos essenciais para os vegetais, desde que em pequenas quantidades (EMBRAPA, 2013). Os teores de B e Mn apresentaram leve aumento até a dose de 80 Mg ha⁻¹ e diminuíram para a dose de 160 Mg ha⁻¹ (Figuras 2C e 2D), o que reflete, possivelmente, a diluição desses elementos nos tratamentos em função dos baixos teores nos lodos. Porém, nenhum dos tratamentos representa ameaça de fitotoxicidade para as culturas agrícolas (RIBEIRO et al., 1999).

A análise de variância, entre os tratamentos, não apontou variação estatisticamente significativa a 5 %, nos conteúdos de matéria orgânica (de 30,75 a 33,62 g dm⁻³), de carbono total (de 17,50 a 19,33 g dm⁻³) e de K (de 4,80 a 2,93 mmol_c dm⁻³).

CONCLUSÕES

Os teores dos metais Cd, Pb, Ni, Cr, Cu, Zn e Mo no lodo da ETE de Paraguaçu – MG e no Latossolo Vermelho com lodo, estiveram abaixo dos limites estabelecidos para utilização agrícola, o que permite sua aplicação aos solos, no mínimo até à dose máxima deste experimento, sem efeitos deletérios às culturas agrícolas e ao meio ambiente.

O lodo de esgoto aumentou, após 30 dias, a fertilidade do solo pela diminuição da acidez, pelo fornecimento de matéria orgânica, dos nutrientes P, Ca, Mg, S e Zn e pelo aumento da SB, CTC e V %.

Após 150 dias, a aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto promoveu o aumento do pH e incremento dos teores de P, Ca, Mg, Zn e S, da SB, CTC e V %, sendo as melhores respostas obtidas na maior dose, de 160 Mg ha⁻¹.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de estudos. À COOXUPÉ, pelas análises químicas. À COSAGUA, pela disponibilização do lodo de esgoto.

REFERÊNCIAS

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. **Applied and Environmental Soil Science**. New York, v. 2011, n.1, p.1-11, jan. 2011.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.4, p.388–393, mar. 2015 a.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife**, v.10, n.1, p.34-42, mar. 2015 b.

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.

CASAROLI, D.; LIER, Q. de J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32 n.1, p.59-66, jan/fev. 2008.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resoluções nº 375 e nº 380, de 29 de agosto de 2006.** Disponível:

<http://www.mma.gov.br/port/conama/res06/res37506.pdf>>. 01 julho de 2010.

COSTA, V. L.; MARIA I. C.; CAMARGO, O. A.; GREGO, C. R.; MELO, L. C.;
Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.3, p.287-293. mar. 2014.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

ESCUDEY, M.; MORAGA, N.; ZAMBRA, C.; ANTILÉN, M. Sewage sludge disposal and applications: self-heating and spontaneous combustion of compost piles - trace metals leaching involcanic soils after sewage sludge disposal. **Waste Water - Evaluation and Management**, Rijeka, v.1, n.1, p.399-430, abr. 2011.

FERRER, A.; ONA, J.; OSORIO, F.; MOCHON, I. Evolution of the Soil and Vegetation Cover on Road Embankments after the Application of Sewage Sludge. **Water Air Soil Pollution**, Berlin, v.214, n.1, p.231-240, jan. 2011.

GUIMARÃES, C. C.; SCHUMACHER, M. V.; WITSHORECK R.; SOUZA H. P.; SANTO, J. C. Biomassa e nutrientes em povoamento de *eucalyptus dunnii maiden* no pampa gaúcho1. **Revista Árvore**, Viçosa, v.39, n.5, p.873-882, set./out. 2015.

HECK, K.; DE MARCO, E. G.; HAHN, A. B. B.; KLUGE, M.; SPILKI, F. R.; VAN DER SAND, S.T. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.1, p.54-59, jan. 2013.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.42, n.3, p.421-428. 1978.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações.** São Paulo: Nobel, 2002. 200p.

MATIAS, S. S. R.; CORREIA, M. A. R.; CAMARGO, L. C.; FARIAS, M. T. de; CENTURION, J. F.; NÓBREGA, J. C. A. Influência de diferentes sistemas de cultivo nos atributos físicos e no carbono orgânico do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.7, n.3, p.414-420, jul./set. 2012.

MOREIRA, R. S.; MINCATO, R. L.; SANTOS, B. R. Heavy metals availability and soil fertility after land application of sewage sludge on dystroferric Red Latosol. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n.1, p.512 - 520, nov./dez. 2013.

NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Yield and nutrition of sunflower fertilized with sewage sludge stabilized by different processes. **Revista Ceres**, Viçosa, v.60, n.5, p.683-689, set/out. 2013.

NEEDELMAN, B. A. What are soils? Nature Education Knowledge. **Nature**, London, v.4, n.3, 2013. Available in <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/what-are-soils-67647639>. Acesso setembro de 2015.

PAGLIA, E. C.; SERRAT, B. M.; FREIRE, C. A. de L.; VEIGA, A. M.; BORSATTO, R. S. Doses de potássio na lixiviação do solo com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.1, p. 94-100. jan/fev. 2007.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S. do; MELO, W. J. de. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. **Nucleus**, Ituverava, v.8, n.1, p.183-192, abr. 2011.

R CORE TEAM R: **A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014.

RHEINHEIMER, D. S.; ALVAREZ, J. W. R.; OSÓRIO FILHO, B. D.; SILVA, L. S.; BORTOLUZZI, E. C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.562-569, mai./jun. 2005.

RIBEIRINHO, V. S.; MELO, W. J.; SILVA, D. H.; FIGUEIREDO, L. A.; MELO, G. M. P. Fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade de girassol, em função da aplicação de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.42, n.2, p.166-173, abr./jun. 2012.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; PAULA JÚNIOR, D. R. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado: II - Atributos químicos e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.543-551, jan. 2010.

ROMEIRO, J. C. T.; GRASSI FILHO, H.; MOREIRA, L. L. Q. Absorção de N, P, K, Ca e Mg por laranjeiras 'pêra' fertilizadas com lodo de esgoto compostado em substituição à adubação nitrogenada mineral. **Irriga**, Botucatu, v.19, n.1, p.82-93, jan/mar. 2014.

SÍGOLO, J. B.; PINHEIRO, C. H. R. Lodo de esgoto da ETE Barueri – SP: Proveniência do enxofre elementar e correlações com metais pesados associados. **Geologia USP Série Científica**, São Paulo, v.10, n.1, p.39-51. mar. 2010.

SPAROVEK, G., VAN LIERB, Q. J., DOURADO NETO, D. Computer assisted Köppen climate classification: case study for Brazil. **International Journal of Climatology**, Nova Jersey, v.27, n.2, p. 257-266, oct. 2007.

ARTIGO II

Efeito do lodo de esgoto na produtividade do milho

AUTORES: Rômulo Spuri Barbosa, Breno Régis Santos, Douglas José Marques, Eric Batista Ferreira, Marcio Donizetti de Andrade, Ronaldo Luiz Mincato.

Artigo redigido conforme normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

Efeito do lodo de esgoto na produtividade do milho

Rômulo Spuri Barbosa⁽¹⁾, Breno Régis Santos⁽²⁾, Eric Batista Ferreira⁽³⁾, Douglas José Marques⁽⁴⁾, Márcio Donizetti de Andrade⁽⁵⁾, Ronaldo Luiz Mincato^{(6)*}

- (1) Biólogo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, romulospuri@hotmail.com
- (2) Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, brenors@yahoo.com.br
- (3) Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências Exatas, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, ericbferreira@gmail.com
- (4) Engenheiro Agrônomo, Universidade José do Rosário Vellano, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências Agrárias, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, douglasjmarques81@yahoo.com.br
- (5) Químico, Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé Ltda., Guaxupé, Minas Gerais, Brasil, marciodandrade@ig.com.br
- (6) Geólogo, Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Alfenas, Instituto de Ciências da Natureza, Alfenas, Minas Gerais, Brasil, ronaldomincato@gmail.com

* Autor correspondente (35) 32991419

RESUMO: O lodo de esgoto contém quantidades consideráveis de elementos essenciais às plantas e elevado teor de matéria orgânica, podendo desempenhar papel importante na manutenção da fertilidade e no condicionamento dos solos e, por conseguinte, na produção agrícola. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a produtividade do milho cultivado em Latossolo Vermelho adubado com diferentes doses de lodo de esgoto da ETE de Paraguaçu – MG. O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação e constituído pela aplicação das doses de 10, 20, 40, 80 e 160 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto em comparação ao tratamento com apenas adubação mineral. Foram avaliados os componentes de produção: matéria seca, comprimento e diâmetro da espiga, número de fileiras por espiga, número de grãos por fileira, peso de 100 grãos e rendimento da planta. Os tratamentos com as maiores doses de lodo de esgoto apresentaram rendimentos superiores à adubação mineral, a 5 % de significância, o que suporta o potencial fertilizante e aponta a dose de 160 Mg ha⁻¹, como a recomendada.

PALAVRAS-CHAVE: biossólidos, *Zea mays*, produção agrícola.

ABSTRACT: The sewage sludge contains considerable quantities of essential elements to plants and high content of organic matter, and can play an important role in maintaining fertility and soil conditioning and, consequently, in agricultural production. The purpose of this study was to evaluate the productivity of corn grown in Red Latosol manured with different doses of sewage sludge of ETE of the Paraguaçu - MG. The experiment was conducted in greenhouse conditions and the application of doses of 10, 20, 40, 80 and 160 Mg ha⁻¹ of sewage sludge as compared to treatment with only mineral fertilization. The Production components evaluated were dry weight, length and diameter of the cob, number of ranks per Spike, number of grains per row, weight of 100 grains and plant yield. The treatments with the highest doses of sewage sludge exhibited higher yields to mineral fertilization, the 5% of significance, which supports the potential fertilizer and points the dose of 160 Mg ha⁻¹, as recommended.

KEYWORDS: biosolids, *Zea mays*, agricultural production

Introdução

Há, no momento, um acentuado crescimento no volume de esgoto tratado no país e o lodo gerado nas ETE (Estações de Tratamento de Esgoto) necessita de uma disposição adequada, para não tornar um novo passivo ambiental. A aplicação em solos agrícolas é uma alternativa sustentável, que além de reduzir os altos custos e impactos ambientais relacionados com os demais métodos de disposição, promove a reintegração de um produto de descarte ao ciclo produtivo (Nuvolari et al., 2011).

Essa alternativa adiciona elementos ao solo que podem alterar suas propriedades químicas, físico-químicas e biológicas afetando, em geral, positivamente o desenvolvimento das plantas (Bremm et al., 2012). A matéria orgânica e nutrientes disponíveis no lodo conferem caráter de fertilizante orgânico e de condicionador do solo. Os metais pesados, por sua vez, são potencialmente tóxicos e podem ser acumulados no meio ambiente e entrar na cadeia alimentar (Nascimento et al., 2014). No Brasil, o uso do lodo na agricultura só é permitido quando os metais pesados estiverem em concentrações abaixo dos limites estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, nas resoluções 375 e 380 de 2006 (CONAMA, 2006).

O lodo de esgoto condiciona o solo, aumenta a capacidade de retenção de água, a porosidade e a estabilidade dos agregados, pela adição de matéria orgânica (Bonini et al., 2015). Já, seu efeito de fertilizador é amparado pela presença de elementos essenciais às plantas, como N, P, Ca, Mg, S e micronutrientes que são absorvidos dos solos (Oliveira et al., 2002). Tais efeitos podem contribuir diretamente com aumento da produtividade das lavouras.

A produção agrícola no Brasil ainda é dependente dos fertilizantes minerais, que são caros e contribuem para a redução dos recursos naturais, e dessa forma, alternativas que diminuam os custos na agricultura, preserve o meio ambiente e proporcione incrementos da produtividade são necessárias. O uso do lodo de esgoto nos solos é um método de adubação de baixo custo e contribui para economia das reservas minerais e de energia elétrica utilizados na fabricação dos fertilizantes minerais (Camargo e Bettioli, 2010). Além disso, o lodo oferece maior estabilidade no fornecimento de nutrientes para as plantas ao longo do tempo, ao contrário da fertilização mineral, onde nutrientes estão prontamente disponíveis e logo são perdidos por processos de lixiviação e percolação (Melo e Marques, 2000).

A elevada variabilidade composicional existente nos lodos e nos solos demandam ensaios regionais para definição de critérios para aplicação dos lodos em solos agrícolas (Heck et al., 2013). O sul de Minas Gerais apresenta a maior produção estadual de milho, porém com baixa produtividade (CONAB, 2016) e ainda são escassos os estudos que

analisam a utilização agrícola dos lodos gerados na região. Para estudar os efeitos de doses crescentes de lodo de esgoto da COSÁGUA – Paraguaçu, Minas Gerais, sobre a produtividade do milho, em comparação com a fertilização mineral, foi realizado um ensaio para obter os componentes de produção da planta.

Materiais e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Alfenas – Unidade Educacional I, em Alfenas, Minas Gerais. O lodo de esgoto foi obtido na Estação de Tratamento de Esgotos de Paraguaçu, Minas Gerais, proveniente de tratamento biológico em reator do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), que recebe e trata esgoto doméstico pelo processo anaeróbio. A coleta das amostras de lodo de esgoto foi realizada em setembro de 2014, quando os 3 tanques de secagem da ETE estavam cheios. Foram coletadas 9 amostras, 3 por tanque, equidistantes e do topo até a base do tanque. Para os ensaios físicos e químicos as amostras foram secas em estufa durante 3 dias a 65° C, moídas, quarteadas e encaminhadas para o Laboratório de Análises Químicas da COOXUPÉ, em Guaxupé, Minas Gerais, conforme procedimentos Malavolta et al. (2002). Os resultados são apresentados no Quadro 1.

Inserir Quadro 1

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho eutrófico com textura média (Embrapa, 2013), coletado em uma área que não recebia adubação há 15 anos, localizada a 21° 25' de latitude sul e 45° 57' de longitude a oeste de Greenwich e altitude de 880 m. A amostra de solo foi analisada no Laboratório de Análises Químicas da COOXUPÉ, de acordo com a metodologia de Raij et al. (2001). Ao resultados estão listados no Quadro 2.

Inserir Quadro 2

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com unidades experimentais compostas por vasos de 25 dm³, num arranjo de 6 tratamentos e 6 repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Cada vaso recebeu 25 kg de amostra composta de solo seco ao ar e à sombra, peneirado em malha 2 mm, misturado e homogeneizado com 125, 250, 500, 1000 e 2000 g de lodo de esgoto por vaso, correspondendo, respectivamente a 10, 20, 40, 80 e 160 Mg ha⁻¹ (base seca), respectivamente, e um tratamento testemunha apenas com adubação

mineral. A determinação da dose de adubo mineral do tratamento testemunha teve, como base, a análise do solo (Quadro 2) e recomendações técnicas para a cultura do milho em vasos (Novais et al., 1991) e apresentado no Quadro 3. Os vasos com lodo de esgoto foram lentamente saturados por irrigação superficial até atingir a capacidade de campo (Casaroli e Lier, 2008) e em seguida incubados por 30 dias.

Inserir Quadro 3

Após a incubação uma amostra por vaso em cada tratamento foi coletada. As amostras foram misturadas e homogeneizadas, secadas ao ar e à sombra, peneiradas e separada uma alíquota para caracterização química no Laboratório de Análises Químicas da COOXUPÉ. O pH foi determinado em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$. O carbono total e matéria orgânica após extração pelo método do bloco digestor foram determinados por titulometria e o P foi extraído com resina trocadora de íons e quantificado por Espectroscopia UV/Visível. Os elementos Ca, Mg, Al e K trocáveis foram extraídos por NH_4Cl 1 mol L^{-1} ; o S pelo método BaCl_2 em pó; o B pelo BaCl_2 a quente com microondas; o Cu, Fe, Mn e Zn extraídos por DTPA-TEA a pH 7,3; os metais pesados Cd, Pb, Mo, Ni sofreram digestão com água-régia e todos foram quantificados por ICP-OES (Espectroscopia de Emissão com Plasma Indutivamente Acoplado). Os resultados são apresentados no Quadro 4.

Inserir Quadro 4

Para avaliação do efeito das aplicações de doses crescentes de lodo de esgoto na produtividade do milho, em outubro de 2014, efetivou-se o cultivo do milho híbrido P364YH. Foram semeadas quatro sementes por vaso e no décimo dia foi realizado o desbaste, deixando apenas uma planta por vaso até a maturação fisiológica. A irrigação foi realizada por superfície com turno de rega diário para manutenção da capacidade de campo (Casaroli e Lier, 2008).

Ao final do ciclo da cultura, quando os grãos de milho apresentaram umidade a 13 %, ou seja, 120 dias após o plantio, foi feita a colheita, cortando as plantas rente ao solo. As variáveis explicativas dos componentes de produção foram: massa seca da parte aérea (colmo, folha, sabugo e palha), CE (comprimento da espiga), DE (diâmetro da espiga), NFE (número de fileiras por espiga), NGF (número de grãos por fileira), peso de 100 grãos e rendimento da planta (Brasil, 2009). Para o peso dos grãos e da matéria seca da parte aérea as amostras

foram secas a 65° C em estufa de ventilação forçada até atingirem peso constante e, em seguida, pesadas em uma balança de precisão marca SHIMADZU, modelo AUY22. Para medição do comprimento e diâmetro da espiga utilizou um paquímetro digital graduado em mm marca King Tools, modelo WITHIN 300 mm. Além disso, foi coletado uma amostra de solo por vaso para análise dos mesmos parâmetros pelos mesmos procedimentos analíticos adotados na caracterização do solo após incubação do lodo, no Laboratório de Análises Químicas da COOXUPÉ. O Quadro 5 apresenta a média das seis amostras de cada tratamento.

Inserir Quadro 5

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) seguida de Teste de Tukey e ajuste das equações para os componentes de produtividade do milho em função das doses de lodo aplicadas. Nos testes foi considerado o nível de 5 % de significância. Mediante o modelo de regressão ajustado foi feita a predição das doses de lodo de esgoto equivalente à resposta obtida no tratamento com adubação mineral. As análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2015).

Resultados e discussão

Os resultados analíticos do lodo de esgoto (Tabela 1) são comparados aos limites determinados pelas Resoluções Conama 375 e 380 (Conama, 2006) e apresentados no Quadro 6.

Inserir Quadro 6

Todos os metais apresentaram concentrações abaixo dos limites máximos legais e, portanto, os teores desses elementos não impedem a aplicação do lodo no cultivo do milho.

Os resultados da análise de variância revelaram que a matéria seca da parte aérea, CE, DE, NFG, NGF e o rendimento aumentaram com a aplicação do lodo de esgoto (Figura 1).

Inserir Figura 1

Já, o peso de 100 grãos não apresentou diferença estatística entre os tratamentos. O potencial do lodo de esgoto em fornecer nutrientes para as culturas, e substituir os fertilizantes

minerais, pode ser confirmada por meio da comparação entre os resultados obtidos para esses componentes de produção com as doses de lodo de esgoto, em relação à adubação mineral. A produção da matéria seca aumentou linearmente com as doses de lodo de esgoto, variando de 135,96 g, na dose mínima, a 196,97 g na maior dose do resíduo (Figura 1A). O efeito do lodo sobre incrementos da fertilidade do solo, especialmente sobre os teores de Ca, B e Zn (Quadros 4 e 5), que são elementos fundamentais para a nutrição do milho, refletiu no acúmulo de matéria seca da planta. No tratamento com adubação mineral a produção de matéria seca foi de 162,72 g, equivalente à aplicação de 62 t ha⁻¹ de resíduo, de acordo com o modelo matemático ajustado e portanto, referente a esse componente, o lodo de esgoto pode substituir os fertilizantes minerais. Em concordância com essa observação, Barbosa et al. (2007) identificaram que a maior disponibilidade de nutrientes no solo, proporcionada pela aplicação do lodo de esgoto, contribui fortemente para o acréscimo de matéria seca na planta de milho proporcionando conseqüentemente aumento da produtividade.

As dimensões da espiga são importantes componentes da produtividade do milho (Barbieri et al., 2005). Segundo Cavallet et al. (2000), existe correlação significativa entre o comprimento da espiga e a produtividade. No presente estudo, o CE cresceu de forma quadrática de acordo com a elevação das doses de lodo, obtendo em T4 (80 Mg ha⁻¹) o seu maior tamanho, 145,2 mm (Figura 1B). Em experimento com o milho híbrido duplo AG 1051, utilizando lodo de curtume Guimarães et al. (2015) também encontraram respostas quadráticas positivas no CE, com dimensões similares aos obtidos neste estudo. Pela predição feita, de acordo com o modelo ajustado para esse parâmetro, estima-se que a dose de 65,60 Mg ha⁻¹ de lodo oferece o mesmo CE obtido pelas plantas com adubação mineral, equivalente a 140,66 mm. Já, o DE aumentou, de forma linear, com as doses de lodo, atingindo valor máximo de 46,04 mm com a dose 160 Mg ha⁻¹ de resíduo (Figura 1C), indicando um aumento no enchimento de grãos conforme elevou as doses de lodo. A partir do modelo ajustado para esse parâmetro, a resposta para o DE obtida na adubação mineral pode ser encontrada na aplicação de 80,50 Mg ha⁻¹ de lodo de esgoto.

De acordo com Barbieri et al. (2005), os parâmetros NFE e NGF são importantes indicadores de produção do milho. Em relação ao NFE, ocorreu aumento, da menor para a maior dose, de 12,16 a 14,83 fileiras. O valor máximo obtido para NFE esteve bastante próximo aos valores encontrados por Breda (2003), em que a maior dose de lodo produziu, em média, 14,80 grãos. No ajuste de modelo, a dose 47,5 Mg ha⁻¹ de lodo é a que terá o mesmo número de fileiras da adubação mineral. Balbinot Júnior et al. (2007) avaliando diferentes componentes de produção observou que o NGF foi o que apresentou a maior

correlação total com a produtividade. Houve um aumento linear no NGF no presente estudo, com o valor mínimo de 16,50 e máximo de 24 grãos. Na adubação mineral o número de fileiras foi de 21, quantidade encontrada na dose de 96,40 Mg ha⁻¹ de lodo. Diante disso, é verificado que o suprimento nutricional com lodo de esgoto promoveu um desenvolvimento satisfatório das espigas em relação à adubação mineral.

Segundo Balbinot et al. (2005) e Carvalho (2007), o rendimento é um dos fatores de maior significância do resultado final da produtividade. Na Figura 1E é observado que o aumento das doses de lodo de esgoto promoveu incremento no rendimento, que atingiu valor máximo de 112,90 g/planta, com a aplicação de 160 Mg ha⁻¹ de resíduo. As plantas que receberam adubação mineral tiveram uma média de 100,49 g de g/planta, valor este que, segundo a equação ajustada, pode ser alcançado com a aplicação de 102,8 Mg ha⁻¹ de lodo. Aumentos do rendimento foram observados com o uso de lodo de esgoto, em Argissolo Vermelho por Ceretta et al. (2005) e em Latossolo cultivados com milho por Pauletti et al. (2008).

Não houve diferença estatística entre os tratamentos para o componente peso de 100 grãos. Entretanto, esse comportamento não deixa de representar uma boa resposta do lodo de esgoto no que tange a esse componente, pois mostra que houve uma uniformidade do enchimento de grãos em todas as doses e indica que o lodo de esgoto é tão eficiente quanto a adubação mineral na produtividade do milho, apresentando, entretanto, vantagens de economia com fertilizantes minerais. De acordo com Basso e Cerreta (2000), durante três anos de estudos, não observaram diferenças significativas na produtividade de grãos de milho, utilizando o peso de 100 grãos, em comparação com adubação química, indicando que o uso agrícola desse insumo pode ser importante na elevação da produtividade média desta cultura no Brasil.

Os bons resultados referentes aos componentes de produção obtida para as condições desse estudo se deve principalmente aos altos teores de nutrientes deste resíduo. Como indicado nas tabelas 5 e 6, o lodo de esgoto incrementou importantes nutrientes para o desenvolvimento e produção do milho, como o Ca, o B e o Zn. A matéria orgânica e os teores de Ctotal e S também contribuíram diretamente para as respostas positivas para os componentes analisados. Lemainski e Silva (2006), utilizando lodo de esgoto, concluíram que o lodo foi mais eficiente na produção de grãos de milho, quando comparado com o fertilizante mineral, em função da forma que os nutrientes ficam disponíveis no solo. Usando a maior resposta das predições de equivalência do lodo com a adubação mineral, o rendimento, se tem

que para atingir mesma produtividade de quando utilizado o adubo mineral é preciso aplicar a dose de 102,08 Mg de lodo por hectare.

Conclusões

A aplicação de lodo de esgoto em solo cultivado com milho aumentou a produtividade da cultura, comparativamente à do tratamento sem aplicação de lodo e com adubação química. As doses 80 e 160 Mg ha⁻¹ foram as que representaram as melhores respostas nos componentes de produção avaliados.

A dose resposta equivalente de lodo que obteve a mesma produtividade da adubação mineral é de 102,08 Mg ha⁻¹.

Agradecimento

À CAPES, pela bolsa de estudos. À COOXUPÉ, pelas análises químicas. À COSAGUA, pela disponibilização do lodo de esgoto.

Referências

Balbinot Junior AA, Moraes A, Backes L. Efeito de coberturas de inverno e sua época de manejo sobre a infestação de plantas daninhas na cultura de milho. *Planta Daninha*. 2007; 25:473-480. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582007000300006>.

Barbieri VHB, Luz JMQ, Brito, CH.; Duarte JM, Gomes, LS, Santana DG. Produtividade e rendimento industrial de híbridos de milho doce em função de espaçamentos e populações de plantas. *Hortic. Bras.* 2005; 23:826-830.

Barbosa GM de C, Tavares Filho J, Brito OB, Fonseca ICB. Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade do milho safrinha. *R. Bras Ci Solo*. 2007; 31:601-605. doi:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300020>>

Basso CJ, Ceretta, CA. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. *R. Bras Ci Solo*. 2000; 24:905-915. doi:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832000000400022>>

Bonini CSB, Alves MC, Montanari R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Rev Bras Eng Agríc Ambient*. 2015; 19:388-393. doi:<<http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p388-393>>

Bremm RRR, Damasceno SG, Secco D, Vilas Boas MA, Torres D G B, Mees JBR, Kummer L. Potencial de uso de lodo de esgoto na cultura do milho em latossolo argiloso no oeste do Paraná. *R Bras Ci Amb* 2012; 23:17-24.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária: Mapa/ACS. Brasília, 2009.

Breda CC. Utilização de lodo de efluente doméstico: efeitos na produtividade agrícola e em alguns aspectos ambientais [tese]. Botucatu: Universidade Estadual Paulista; 2003.

Camargo AO, Bettioli W. De resíduo a fertilizante: Uma análise prospectiva do meio ambiente. In: Coscione AR, Nogueira TAR, Pires AMM. Uso agrícola de lodo de esgoto: Avaliação após a resolução no. 375 do Conama. 3ed. Botucatu, FEPAF; 2010. p.13-30.

Carvalho IQ. Espaçamento entre fileiras e população de plantas de milho [dissertação]. Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa; 2007.

Casaroli D, Lier Q de J. Critérios para determinação da capacidade de vaso. R. Bras Ci Solo. 2008; 32:59-66.

Cavallet LE, Pessoa AC dos S, Helmich J J, Helmich PR OST C F. Produtividade do milho em resposta à aplicação de nitrogênio e inoculação das sementes com *Azospirillum* spp. R Bras Eng Agríc Amb. 2000; 4:129-132. doi:
<<http://dx.doi.org/10.1590/S141543662000000100024>>

Ceretta CA, Basso CJ, Vieira FCB, Herbes MG, Moreira ICL, Berwanger AL. Dejeito líquido de suínos: I - perdas de nitrogênio e fósforo na solução escoada na superfície do solo, sob plantio direto. Ciência Rural, 2005; 35:1296-1304.

Conab. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Safra 2014/2015, sétimo levantamento [internet]. Companhia Nacional de Abastecimento; 2016 [acesso em 05 fev 2016] Disponível:
<<http://www.conab.gov.br/acessoabr>>

Conama. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resoluções nº 375 e nº 380 [internet]. Brasília, DF: Conselho Nacional do Meio Ambiente; 2006 [acesso em 01 jul 2010]. Disponível: <www.mma.gov.br/port/conama/res06/res37506.pdf>. 01 julho de 2010.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos; 2013. 3 ed. 353p.

Guimaraes WP, Araújo AS de F, Oliveira MLJ, Araújo F de F, MELO, W de J. Efeito residual de lodo de curtume compostado sobre os teores de cromo e produtividade do milho verde. Científica, Jaboticabal, 2015; 43:37-42.

Heck K, De Marco EG, Hahn ABB, Kluge M, Spilki FR, Van der Sand ST. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. R Bras Eng Agríc Amb. 2013; 17:54-59.

Lemainski J, Silva J da E. Utilização do bio-sólido da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. R Bras Ci Solo. 2006; 30:741-750.

Malavolta E, Pimentel-Gomes F, Alcarde JC. Adubos e adubações. 1 ed. São Paulo: Nobel; 2002. 200p.

Melo WJ, Marques, MO. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas In: Bettiol, W.; Camargo, O.A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. ed. 1. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente; 2000. P.109-141.

Nascimento AL, Junio GRZ, Sampaio RA, Fernandes LA, Carneiro JP, Barbosa CF. Metais pesados no solo e mamoneira adubada com biossólido e silicato de cálcio e magnésio. R Bras Eng Agríc Amb. 2015; 19:505-511.

doi:<<http://dx.doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v19n5p505-511>>

Novais RF, Neves JCL, Barros NF. Métodos de pesquisa em fertilidade do solo: ensaio em ambiente controlado. Brasília: ed. 1. Viçosa: EMBRAPA-SEA; 1991.

Nuvolari A, Telles DD, Ribeiro JT, Miyashita NJ, Rodrigues RB, Araujo de R, Martinell A. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola, 2 ed. São Paulo: Blucher; 2011.

Oliveira FC, Mattiazzo ME, Marciano CR, 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. R Bras Ci Solo. 2002; 26:505-520.

Pauletti, V, Barcellos M, Motta ACV, Monte Serra SB dos IR. Produtividade de culturas sob diferentes doses de esterco líquido de gado de leite e adubação mineral. Scientia Agraria. 2008; 9:199-205.

R Core Team R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. 1 ed. Campinas: Instituto Agrônômico; 2001.

Quadro 1. Caracterização química do lodo de esgoto utilizado no experimento.

Componente	Concentração*
pH	7,20
Fósforo (g kg ⁻¹)	6,55
Potássio (g kg ⁻¹)	0,41
Enxofre (g kg ⁻¹)	11,02
Magnésio (g kg ⁻¹)	4,32
Cálcio (g kg ⁻¹)	40,51
Boro (mg kg ⁻¹)	119,89
Zinco (mg kg ⁻¹)	861,15
Manganês (mg kg ⁻¹)	243,45
Níquel (mg kg ⁻¹)	16,54
Chumbo (mg kg ⁻¹)	46,16
Molibdênio (mg kg ⁻¹)	1,50
Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,50
Cromo (mg kg ⁻¹)	83,46
Cobre (mg kg ⁻¹)	134,67

*Média das 9 amostras retiradas dos leitos de secagem

Quadro 2. Caracterização química do solo utilizado no experimento.

pH	V	Al	H+Al	SB	CTC	K	Ca	Mg	P	Mn	Zn	Fe	B	Ctotal	MO
H ₂ O	%				mmol _c dm ⁻³						mg dm ⁻³				g dm ⁻³
5,7	75	0	23	67,9	90,9	6,9	41	20	35	9,1	2,1	36	0,24	18	31

V: saturação de bases; SB: soma de bases; Ctotal: carbono total; MO: matéria orgânica

Quadro 3 - Nutrientes, concentrações requeridas, e fonte das mesmas utilizadas para adubação do tratamento testemunha com adubação mineral (A.M.).

Nutrientes	Quantidade (mg Kg ⁻¹)	Fonte
N	300	NH ₄ H ₂ PO ₄
P	300	KH ₂ PO ₄
K	200	KH ₂ PO ₄
S	40	K ₂ SO ₄
Mg	46	MgSO ₄ ·7H ₂ O
B	2,5	H ₃ BO ₃
Cu	7,5	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Mo	0,5	(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ ·4 H ₂ O
Zn	2,5	ZnSO ₄ ·7H ₂ O

Fonte: Novais et al. (1991)

Quadro 4. Caracterização química do Latossolo Vermelho após 30 dias de incubação com lodo de esgoto nos diferentes tratamentos adotados, previamente ao plantio do milho.

Elemento	Solo + LE				
	T1	T2	T3	T4	T5
pH	5,58	5,68	5,43	5,71	5,73
Matéria Orgânica (g dm ⁻³)	37,64	48,35	41,59	47,22	41,35
Carbono Total (g dm ⁻³)	21,00	27,00	24,00	27,00	23,00
Fósforo (mg dm ⁻³)	49,15	35,59	39,75	47,59	47,35
Potássio (mmol _c dm ⁻³)	7,12	7,07	6,44	6,82	4,11
Cálcio (mmol _c dm ⁻³)	42,49	47,11	48,14	58,42	77,44
Enxofre (mg dm ⁻³)	57,74	69,16	93,81	166,21	282,85
Magnésio (mmol _c dm ⁻³)	17,24	18,66	18,32	20,39	20,67
Zinco (mg dm ⁻³)	2,49	2,91	3,70	4,59	6,97
Níquel (mg kg ⁻¹)	0,18	0,18	0,18	0,20	0,21
Chumbo (mg kg ⁻¹)	0,89	0,74	0,81	0,69	0,79
Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,51	0,50	0,48	0,52	0,49
Cromo (mg kg ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

LE: lodo de esgoto; T1 = 10 Mg ha⁻¹; T2 = 20 Mg ha⁻¹; T3 = 40 Mg ha⁻¹; T4 = 80 Mg ha⁻¹; T5 = 160 Mg ha⁻¹.

Quadro 5. Caracterização química do Latossolo Vermelho após o cultivo do milho com os diferentes tratamentos adotados.

Elemento	Solo + LE					
	AM	T1	T2	T3	T4	T5
pH	5,00	5,80	5,89	5,87	5,76	6,30
Matéria Orgânica (g dm ⁻³)	30,00	30,74	34,12	31,56	32,85	33,61
Carbono Total (g dm ⁻³)	18,00	17,50	19,33	18,00	18,66	19,16
Fósforo (mg dm ⁻³)	75,09	12,87	18,52	21,16	26,23	34,51
Potássio (mmol _c dm ⁻³)	6,03	4,81	5,16	5,00	4,21	2,93
Cálcio (mmol _c dm ⁻³)	38,74	43,89	50,42	56,00	67,95	95,40
Enxofre (mg dm ⁻³)	2,04	22,11	25,42	57,74	129,48	290,42
Magnésio (mmol _c dm ⁻³)	15,14	16,52	18,41	18,97	21,28	23,56
Zinco (mg dm ⁻³)	3,94	2,45	3,63	4,14	4,74	6,84
Níquel (mg kg ⁻¹)	0,21	0,15	0,18	0,17	0,20	0,15
Chumbo (mg kg ⁻¹)	0,80	0,76	0,74	0,78	0,69	0,53
Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,11	0,51	0,50	0,48	0,52	0,49
Cromo (mg kg ⁻¹)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

LE: lodo de esgoto; AM = Adubação Mineral; T1 = 10 Mg ha⁻¹; T2 = 20 Mg ha⁻¹; T3 = 40 Mg ha⁻¹; T4 = 80 Mg ha⁻¹; T5 = 160 Mg ha⁻¹

Quadro 6. Teores de metais pesados no lodo da ETE de Paraguaçu, MG e os limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA 375 e 380 (CONAMA, 2006) para o uso agrícola.

Elemento	Lodo*		CONAMA
		mg dm ⁻³	
Cádmio	0,50		39,00
Chumbo	46,16		300,00
Níquel	16,54		420,00
Cromo	83,46		1000,00
Cobre	134,67		1500,00
Zinco	861,15		2800,00
Molibdênio	1,50		50,00

*Médias das 9 amostras retiradas dos leitos de secagem.

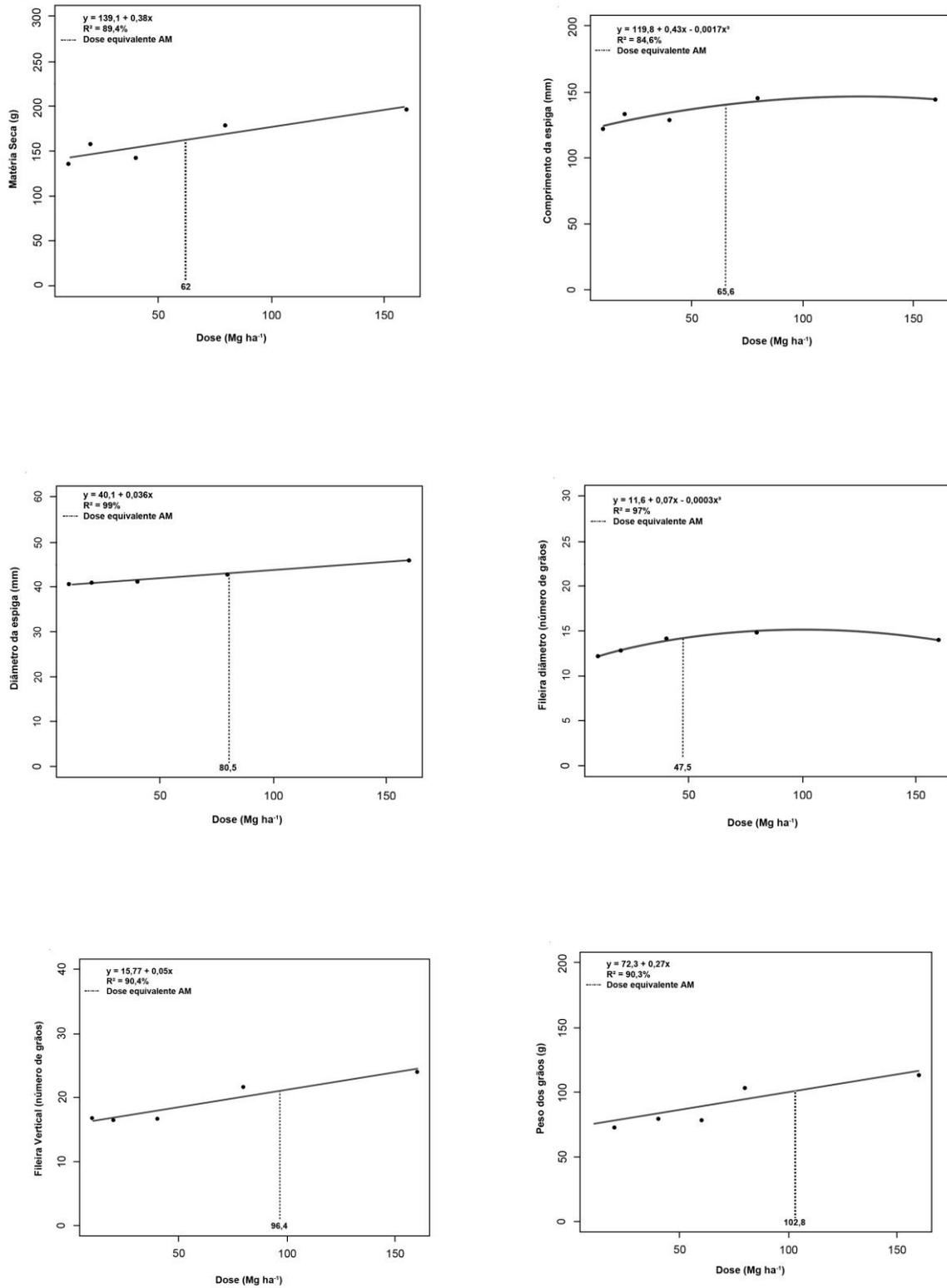


Figura 1: Componentes de produção do milho em razão da adição de lodo de esgoto em doses crescentes (10, 20, 40, 80 e 160 Mg ha⁻¹) e dose de lodo equivalente a resposta obtida com adubação mineral (linha pontilhada).