

Artigo Técnico

Alterações químicas e sanitárias em solos e estéril de mineração receptores de lodo de esgoto sanitário, composto orgânico e fertilizante mineral

Chemical and sanitary changes in soils and sterile of mining receiving sewage sludge, organic compost and mineral fertilizer

Roberta Nunes Guimarães¹ , Antonio Teixeira de Matos¹ , Thais Girardi Carpanezi^{1*} 

RESUMO

Neste estudo, objetivou-se avaliar alterações químicas e sanitárias de solos e estéril de mina da região do Quadrilátero Ferrífero/MG, pela incorporação de lodo de esgoto sanitário e composto orgânico comercial, utilizando a adubação química convencional como tratamento controle. O estudo foi desenvolvido na área experimental da Mina de Águas Claras/MG, sendo os solos (Latosolo e Cambissolo) e estéril de mina analisados por um período de oito meses depois de efetuadas as adubações de, respectivamente, 49,9, 59,7 e 54,8 kg ha⁻¹ de lodo de esgoto sanitário; 117,4, 140,1 e 128,8 kg ha⁻¹ de composto orgânico comercial; e 150 kg ha⁻¹ de fertilizante mineral em todos os materiais. No que se refere aos aspectos sanitários, o lodo de esgoto sanitário e o composto orgânico comercial foram classificados como "Classe A", de acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente 375/2006. Após a aplicação dos adubos, avaliaram-se os teores de matéria orgânica, macro e micronutrientes, capacidade de troca catiônica, índice de saturação por bases, índice de saturação por alumínio, Al³⁺, H+Al, além dos teores de alguns metais pesados nos solos e estéril, além da quantificação de ovos viáveis de helmintos. Observou-se que a incorporação de lodo de esgoto sanitário e composto orgânico comercial foi capaz de aumentar os teores de matéria orgânica e fertilidade dos materiais e, embora a aplicação do lodo de esgoto sanitário também tenha proporcionado aumento nos teores de alguns metais pesados, não foi suficiente para proporcionar perda de sua qualidade ambiental, de acordo com a Conselho Nacional do Meio Ambiente 420/2009 (BRASIL, 2009). Não houve restrições sanitárias para o uso do lodo de esgoto sanitário em solos e estéril a serem recuperados em áreas de mineração do Quadrilátero Ferrífero/MG.

Palavras-chave: Mineração; recuperação de áreas degradadas; adubos orgânicos.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate chemical and sanitary changes in soils and sterile mine in the Quadrilátero Ferrífero region, Minas Gerais, by incorporating the sanitary sewage and commercial organic compost, using a conventional chemical fertilizer as treatment control. The study was carried out in the experimental area of the Mina de Águas Claras, Minas Gerais, the soils (Latosol and Cambisol) and mine sterile were analyzed for a period of 8 months after fertilization, respectively, 49.9; 59.7 and 54.8 t ha⁻¹ SS; 117.4; 140.1 and 128.8 t ha⁻¹ of commercial organic compost; and 150 kg ha⁻¹ of mineral fertilizer in all materials. Regarding sanitary aspects, the SS and the commercial organic compost were classified as "Class A", according to Conselho Nacional do Meio Ambiente 375/2006. After the application of fertilizers, the contents of organic matter, macro- and micronutrients, cation exchange capacity, base saturation index, aluminum saturation index, Al³⁺, H+Al, levels of metals were evaluated in the soil and sterile, in addition to quantifying viable helminth eggs. It was observed that the incorporation of sanitary sewage and commercial organic compost was able to increase the levels of organic matter and fertility of materials and, although an application of sanitary sewage also provided an increase in the contents of some heavy metals, it was not enough to lose its environmental quality, according with Conselho Nacional do Meio Ambiente 420/2009 (BRASIL, 2009). There were no sanitary restrictions on the use of sanitary sewage and commercial organic compost in soils and sterile to be recovered in the Quadrilátero Ferrífero mining areas.

Keywords: Mining; recovery of degraded areas; organic fertilizers

¹Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

*Autor correspondente: tgcarpanezi@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a empresa VALE.

Recebido: 23/06/2020 **Aceito:** 31/01/2022 - **Reg. ABES:** 20200225

INTRODUÇÃO

A exploração mineral, embora gere riqueza e crescimento econômico, traz alguns malefícios como alterações que impactam diretamente os meios físico e biótico, com reflexos imediatos no meio antrópico (AGBOOLA *et al.*, 2020; TEIXEIRA *et al.*, 2020). Nurzhanova *et al.* (2019) afirmam que a indústria de mineração é uma das principais fontes de poluição dos solos, o que a torna um possível risco para a saúde humana e para o meio ambiente, sendo a remediação uma estratégia importante para o desenvolvimento sustentável local.

Um dos grandes impactos causados por essa atividade é o surgimento de áreas degradadas, as quais perderam a capacidade de retornar naturalmente ao seu estado original ou a um equilíbrio dinâmico, ou seja, perderam a sua resiliência (Martins, 2017). Tais áreas não são capazes de repor as suas perdas de matéria orgânica do solo (MOS), nutrientes, biomassa e do banco de sementes, o que engendra diretamente a perda da capacidade produtiva dos solos, além da drástica redução da biodiversidade local. Existem várias técnicas de recuperação das áreas degradadas, como a regeneração natural, a restauração florestal e o controle de erosão, que variam de acordo com o tamanho da área degradada e com o objetivo dessa recuperação.

No Quadrilátero Ferrífero/MG (QF), o aumento dessas áreas degradadas pela mineração ao longo dos anos, somado à falta de planejamento e à falta de uma recuperação efetiva, tem potencializado o surgimento de notórios impactos ambientais, sendo a remoção do horizonte superficial do solo apontada como uma das principais causas dessa degradação. O solo é um importante elemento do meio ambiente, uma vez que é o suporte físico-químico da vegetação, funciona como filtro natural de poluentes, é um efetivo trocador de íons, além de atuar como importante reservatório de MO (CAVALCANTI *et al.*, 2021).

A matéria orgânica (MO) é a principal responsável pela manutenção da qualidade do solo nas áreas degradadas, e a sua perda causa sérios problemas à estrutura do solo, à manutenção do seu aporte vegetal e à sua atividade biológica. O processo de revegetação por meio da aplicação de materiais orgânicos melhora as características físicas, químicas e físico-químicas do solo, uma vez que a ação cimentante desses materiais proporciona melhorias na sua estrutura e aumento da capacidade de retenção de água e nutrientes (MATOS, 2014; SÁNCHEZ, 2015).

O teor de MOS está diretamente associado à sua erodibilidade, visto que solos com menos de 2% de material orgânico são considerados erodíveis, fator que aumenta linearmente com a elevação do teor de MOS (LIU *et al.*, 2010). Para a maioria dos solos, a estabilidade estrutural dos agregados diminui quando práticas de manejo inadequadas proporcionam redução no teor de MOS (PAUL *et al.*, 2013). Dessa forma, o cálculo com base na porcentagem de MO contida no material utilizado como adubo em áreas degradadas é uma forma de garantia da aplicação do teor mínimo (2%) capaz de melhorar as características químicas e físicas dos solos, tornando-os menos susceptíveis a processos erosivos e, portanto, potencializando a sua recuperação.

Decorrente da presença de MO e diversos nutrientes na sua composição, o lodo de esgoto sanitário, denominado “biossólido”, pode ser uma interessante alternativa à adubação orgânica convencional, além de a sua utilização para a recuperação de áreas degradadas ser uma alternativa promissora para a disposição final desse resíduo. Entretanto, antes de ser reaproveitado, ele deve ser tratado e estabilizado para que seja reduzido o aporte de possíveis agentes patogênicos ao meio (NASCIMENTO *et al.*, 2017). O aproveitamento agrícola do lodo de esgoto sanitário apresenta-se promissor, sendo amplamente recomendada a

sua aplicação como condicionador e/ou fertilizante de solo (MESQUITA *et al.*, 2017; ALVES *et al.*, 2021).

Visando à recuperação do ambiente por meio da reestruturação do solo, protegendo-o contra processos erosivos, o presente trabalho tem por objetivo avaliar alterações químicas e sanitárias em solos e estéril de pilha de mina do Quadrilátero Ferrífero/MG, quando neles são incorporados lodo de esgoto sanitário e composto orgânico comercial.

METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido na área experimental localizada na Mina de Águas Claras, no município de Nova Lima/MG, nas coordenadas geográficas de latitude 19.93711 e longitude 43.966938, com altitude média de 725 metros. O clima local é classificado como subtropical úmido (Cwa), com inverno seco e verão chuvoso (CLIMATE, 2020). O período de monitoramento das alterações ocorridas nos solos e estéril foi de oito meses, com início em junho de 2017 e fim em fevereiro de 2018.

O experimento foi elaborado em um delineamento em blocos inteiramente casualizados, preparados em campo, com três tratamentos (lodo de esgoto, composto orgânico comercial e fertilizante mineral), três materiais (amostras do horizonte A de um Cambissolo e de um Latossolo, além de amostra de estéril de pilha de mina) e três repetições, o que totalizou 27 unidades experimentais com 3 m² cada. As parcelas experimentais foram preparadas para terem 2 m de comprimento e 1,5 m de largura e, entre elas, 1 m de área de circulação. Adotou-se, ainda, uma faixa de 30 cm de bordadura entre os tratamentos. A camada de solos e estéril foi formada com profundidade de 0,50 m, sendo todas as parcelas devidamente identificadas por meio de placas informativas, as quais sinalizavam o tipo material receptor e o tratamento aplicado. As especificações de cada tratamento proposto pelo estudo estão apresentadas na Tabela 1.

Caracterização dos Solos e Estéril

Em busca da maior representatividade das classes de solos presentes no Quadrilátero Ferrífero/MG, foram utilizadas amostras de Cambissolos e estéril de pilha provenientes da mina de Capitão do Mato, em Nova Lima/MG, além de amostras de Latossolos provenientes das imediações da mina de Timbopeba, em Ouro Preto/MG. O material foi retirado do horizonte A dessas áreas degradadas, as quais não possuíam cobertura vegetal, assim como apresentavam baixa possibilidade de regeneração natural. A escolha deu-se em razão da facilidade de acesso e por representar as características climáticas, topográficas e pedológicas encontradas no Quadrilátero Ferrífero.

Tabela 1 – Delineamento Experimental.

Tratamento com Fertilização por Lodo de Esgoto Sanitário	Tratamento com Fertilização por Composto Orgânico	Tratamento com Fertilização por Fertilizante Mineral
T21 - Lodo + Cambissolo	T31 - Composto orgânico + Cambissolo	T41 - Fertilizante Mineral + Cambissolo
T22 - Lodo + Latossolo	T32 - Composto orgânico + Latossolo	T42 - Fertilizante Mineral + Latossolo
T23 - Lodo + Estéril	T33 - Composto orgânico + Estéril	T43 - Fertilizante Mineral + Estéril

Em 30 de junho de 2017, antes da aplicação dos adubos, foi realizada a caracterização dos solos e estéril utilizados e, para isso, avaliaram-se as características químicas e de fertilidade, além dos elementos e substâncias químicas tóxicas. Foram quantificados os macronutrientes e micronutrientes disponíveis, H+Al trocáveis, além de condutividade elétrica na pasta de saturação, pH, nitrogênio total, teor de argila, capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva, saturação por bases e soma de bases pelos métodos de análises estabelecidos no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da EMBRAPA (2017). Para a determinação dos macros e micronutrientes foi utilizado o extrator de resina de troca iônica, espectrofotometria de absorção atômica, o método de colorimetria e fotometria de chama. A determinação por potenciometria (Digimed) foi utilizada para caracterizar os valores de pH e acidez potencial. Para a definição da soma de MO foram empregados o método calorimétrico e a extração com ácido sulfúrico e dicromato de sódio, com determinação por colorimetria. Os valores das somas de bases, capacidade de troca catiônica e CTC saturada foram obtidos por cálculos.

Para a análise das variáveis inorgânicas, foi feita a quantificação das concentrações totais de arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, crômio, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco, utilizando-se o método de análise 3050 e 3051 da United States Environment Protection Agency (U.S. EPA) (USEPA, 2007). Já para as substâncias orgânicas, foram analisados os benzenos clorados, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, fenantreno, poluentes orgânicos persistentes (POP) constantes na lista da Convenção de Estocolmo, fenóis não clorados, fenóis clorados, benzenos clorados, ésteres de ftalatos, fenóis não clorados, fenóis clorados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. Para a realização de todas as análises de substâncias orgânicas listadas foi seguido o método estabelecido pela U.S. EPA SW-846 (USEPA, 1979; 1993).

Foi realizada, ainda, a quantificação do teor natural de MO nos solos e estéril no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Seguiu-se a metodologia estabelecida no *Manual de Métodos de Análise de Solo* da EMBRAPA (1997), com os valores de 0,31 dag kg⁻¹ no estéril, 0,44 dag kg⁻¹ no Latossolo e de 0,15 dag kg⁻¹ no Cambissolo. Essa quantificação possibilitou o cálculo da dose de aplicação de lodo de esgoto sanitário suficiente para elevar os teores de MO a 2% em relação aos seus valores iniciais. Importante ressaltar que a adoção do cálculo da dose de aplicação baseada no teor de MO foi realizada para se observarem as mudanças do solo em função do aumento desses teores em cada solo e estéril causados pelas doses aplicadas. Além disso, o teor de 2% de MO no solo é o mínimo para que este comece a mudar as suas características.

Análise do Potencial Agronômico

Com o intuito de avaliar o potencial agronômico do composto orgânico comercial e do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto (ETE) Betim, foram quantificados os seus teores de carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, teor de água e sólidos voláteis e totais, além de pH em água, de acordo com os métodos de análise estabelecidos pelo U.S. EPA SW-846 (USEPA, 1997). Feita essa classificação, foi possível calcular a quantidade de N disponibilizável pelo lodo do esgoto quando este foi incorporado ao solo, conforme está estabelecido na Resolução CONAMA 375.

Análise da Qualidade Sanitária do Lodo de Esgoto

A qualidade sanitária do lodo de esgoto foi examinada por meio da análise de organismos patogênicos de difícil remoção. Para tal, foi avaliada a variável presença de ovos viáveis de helmintos, pelo método de análise estabelecido pelo U.S. EPA *Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix I - Test Method for Detecting, Enumerating, and Determining the Viability of Ascaris Ova in Sludge*, p. 166, EPA/625/R-92/013, 2003 (USEPA, 1992; 2003).

Adubação

Para a realização das adubações foram utilizados composto orgânico comercial, fertilizantes minerais e lodo de esgoto sanitário. O primeiro foi adquirido de uma agropecuária localizada em Betim/MG, de nome comercial Isofert, e classificado pela Instrução Normativa (INS) nº 25 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como “fertilizante composto orgânico classe D”, sob número 90670 10000-1, sendo constituído por resíduos de vegetais e do processo de produção da celulose. O fertilizante mineral composto aplicado foi o NPK 10-10-10, adquirido na Agropecuária Vila Verde, que foi utilizado como tratamento controle deste experimento. Já o lodo aplicado foi oriundo da ETE Betim Central, da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), situada em Betim/MG, sendo o seu sistema de tratamento do esgoto sanitário constituído por reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) seguido de lodos ativados e decantador secundário. Nele, o lodo passa por digestores, é desaguado e, em seguida, passa pela secagem térmica sob temperaturas de até 900 °C. No presente trabalho, apenas o lodo submetido à secagem térmica foi utilizado, pela facilidade do seu transporte e aplicação nas amostras de solo e estéril.

A dose de adubação química (NPK) equivaliu a 150 kg ha⁻¹ e foi subdividida em três aplicações, conforme recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999), definida com base na adubação para estabelecimento de pastagens. A determinação das doses de aplicação dos adubos orgânicos aos solos e estéril foi obtida por meio da Equação 1. Considerou-se uma massa específica de 1,0 g cm⁻³, que o adubo será incorporado em uma camada de 0,20 m e que ele tenha 2.000 t de material por hectare. Logo, a dose de aplicação de lodo de esgoto sanitário foi de 54,8 kg ha⁻¹ no estéril, de 49,9 kg ha⁻¹ no Latossolo e de 59,7 kg ha⁻¹ em Cambissolo, e a do composto orgânico comercial foi de 128,8 kg ha⁻¹ no estéril, de 117,4 kg ha⁻¹ no Latossolo e de 140,1 kg ha⁻¹ em Cambissolo.

$$Ma = \frac{\left(\frac{MOd - MO_n}{100}\right) \times 2000}{\frac{MO_i}{100}} \quad (1)$$

Em que:

Ma = massa de adubo a ser adicionada por hectare;

MOd = teor de MO desejada (% ou dag kg⁻¹);

MO_n = teor de MO natural em cada material (substrato) (% ou dag kg⁻¹);

MO_i = teor de MO no adubo utilizado (% ou dag kg⁻¹).

A aplicação dos fertilizantes deu-se em 25 de julho de 2017. Em 22 de setembro de 2017, foi efetuada a semeadura manual das espécies vegetais milheto, azevém, lablab, feijão guandu, crotalaria ocreoleuca, estilosantes, aveia forrageira, girassol e nabo forrageiro, típicas de cerrado, nas parcelas experimentais,

em quantidades aproximadas de 20 g de sementes por m², para se considerar o seu efeito na composição química dos solos e estéril, ao longo do período de experimentação.

Amostragem dos Tratamentos

Em 10 de outubro de 2017 e 22 de fevereiro de 2018, foram feitas amostragens compostas das misturas de solos e estéril com lodo de esgoto sanitário e de solos e estéril e fertilizantes químicos convencionais, coletadas em cada parcela experimental, na profundidade de 0 a 20 cm. Os resultados obtidos nas análises efetuadas na primeira data foram caracterizados como relativos à 1ª coleta e os da segunda data como relativos à 2ª coleta. Foram avaliados os teores de MO, macro e micronutrientes disponíveis, os valores de T (CTC a pH 7), t (CTC efetiva ou a pH do solo), índice de saturação por bases (V%), índice de saturação por alumínio (m%), Al³⁺ e H+Al, conforme metodologia EMBRAPA (2017) e os teores totais de metais pesados (Zn, Ni, Cr, Cd e Pb), quantificados em extrato de ácido nítrico, conforme metodologia estabelecida nas análises 3050 e 3051 da U.S. EPA SW-846 (USEPA, 2007).

Análise estatística dos dados

Para a análise estatística dos dados foram utilizados testes estatísticos de Wilcoxon pareado e de Tukey, considerando-se 5% de nível de significância (Frank, 1945; Tukey, 1977). O primeiro foi aplicado para a comparação das variáveis nas duas coletas de solo ou estéril, na camada 0–20 cm das parcelas experimentais, o que permitiu efetuar uma comparação entre as médias das substâncias analisadas antes e depois da adubação. Para tal, foi feita a comparação dos resultados laboratoriais antes da aplicação das adubações com os valores obtidos na primeira e na segunda coleta de material.

Já o teste estatístico de Tukey foi empregado para a comparação dos teores de elementos/substâncias químicas entre os dois tipos de solos, de estéril e entre as três diferentes fontes de adubação. Foi utilizado para comparar as médias de teor presente nos materiais Latossolo, Cambissolo e estéril e se houve efeito da aplicação do lodo de esgoto sanitário, do composto orgânico e do fertilizante químico nas características químicas e na qualidade sanitária desses receptores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização química e de fertilidade, a avaliação de elementos e substâncias químicas tóxicas e a análise das variáveis orgânicas e inorgânicas dos solos e estéril estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3. Na Tabela 4 é mostrada a caracterização química em relação ao potencial fertilizante para o solo para a determinação do potencial agrônomo do composto orgânico comercial e do lodo gerado na ETE Betim.

Os teores de MO apresentados para o estéril e solos são extremamente baixos, o que reforça a necessidade da sua elevação para a recuperação das áreas degradadas, tendo em vista que baixos teores de MOS impedem a plena recuperação física, química e biótica dos solos/substratos. Os teores de cálcio, magnésio, soma de bases e CTC efetiva estão baixos em todos os solos avaliados, de acordo com o estabelecido pelo Ribeiro *et al.* (1999). Os níveis de CTC efetiva têm relação com os baixos teores de MO encontrados; com isso, espera-se que a lixiviação de macronutrientes, como nitrogênio e potássio, seja mais acentuada nesses materiais, havendo menor capacidade de retenção de água, bem como retenção de outros cátions.

O potássio disponível também foi encontrado em baixas concentrações em todas os solos/substrato avaliados. Os teores de enxofre e fósforo, assim como os teores disponíveis dos micronutrientes zinco e manganês, podem ser considerados satisfatórios em termos de fertilidade de solo, conforme estabelecido pela Ribeiro *et al.*, (1999).

O lodo de esgoto sanitário e o composto orgânico possuem razão de sólidos voláteis em relação a sólidos totais menor que 0,70 e são, portanto, considerados resíduos já estabilizados (BRASIL, 2006). No caso do lodo de esgoto, o grau de estabilidade, quando menor que 0,70, associa-se à ausência de odores e à atratividade de insetos e vetores nos locais de aplicação e estocagem do produto no campo.

Com relação aos teores de MO nos solos, verifica-se que, mesmo tendo sido calculada uma massa de adubo orgânico capaz de aumentá-los a 2%, passados 75 dias da incorporação ao solo, ocasião em que foi efetuada a 1ª coleta, esses teores ficaram abaixo desse valor. A principal razão para

Tabela 2 - Análise da fertilidade, das características químicas e físico-químicas e da presença de elementos químicos tóxicos dos solos e estéril utilizados antes da incorporação dos adubos.

	Unidade	Estéril	Latossolo	Cambissolo
Condutividade Elétrica	dS m ⁻¹	0,01	0,01	0,01
CTC (t)	cmol _c dm ⁻³	1,18	1,55	2,1
H + Al	cmol _c dm ⁻³	1,56	1,16	1,05
pH em CaCl ₂	-	6,7	6,9	7,5
Saturação de Bases	V %	42	56	66
Soma de Bases	cmol _c dm ⁻³	1,15	1,53	2,08
Matéria Orgânica (%)	%	0,305	0,435	0,146
Boro	mg kg ⁻¹	0,03	0,16	0,07
Cobre	mg kg ⁻¹	0,8	0,94	1,15
Ferro	mg kg ⁻¹	62,49	58,54	69,72
Manganês	mg kg ⁻¹	108	120	146
Potássio	mg dm ⁻³	18,41	20,48	14,27
Cálcio	cmol _c dm ⁻³	0,92	1,13	1,88
Alumínio	cmol _c dm ⁻³	0,03	0,02	0,02
Fósforo	mg kg ⁻¹	11,55	93,64	39
Magnésio	cmol _c dm ⁻³	0,18	0,35	0,16
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg kg ⁻¹	494,2	529	378,8
P-Rem	mg L ⁻¹	7,84	32,2	11,34
Enxofre	mg kg ⁻¹	57,8	23,12	58,58
Arsênio	mg kg ⁻¹	8	80	24
Cádmio	mg kg ⁻¹	0,1	0,5	0,4
Chumbo	mg kg ⁻¹	31	15	18
Crômio	mg kg ⁻¹	49	18	30
Mercúrio	mg kg ⁻¹	0,49	0,24	0,25
Molibdênio	mg kg ⁻¹	< 1	< 1	< 1
Níquel	mg kg ⁻¹	15	38	46
Selênio	mg kg ⁻¹	3,33	3,36	3,33
Zinco	mg kg ⁻¹	4,16	3,01	1,95

CTC: capacidade de troca catiônica

Tabela 3 - Caracterização química dos solos e estéril em relação à presença de substâncias orgânicas tóxicas.

Variáveis	Grupo	Unidade	Cambissolo	Latossolo	Estéril
Fenantreno	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
Indeno(1,2,3, cd)pireno	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
2,4-Diclorofenol	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
Pentaclorofenol	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
Lindano (g-HCH)	COSV	mg kg ⁻¹	<0,0025	<0,0025	<0,0025
Cresóis totais	COSV	mg kg ⁻¹	<0,008	<0,0082	<0,0079
Naftaleno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,2,3-Triclorobenzeno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,2,4-Triclorobenzeno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,2-Diclorobenzeno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,3,5-Triclorobenzeno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,3-Diclorobenzeno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,4-Diclorobenzeno	COV	mg kg ⁻¹	<0,01	<0,01	<0,01
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	COSV	mg kg ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05
Di(2-etilhexil) ftalato	COSV	mg kg ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05
Dibutilftalato	COSV	mg kg ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05
Dimetil ftalato	COSV	mg kg ⁻¹	<0,05	<0,05	<0,05

COSV: compostos orgânicos semivoláteis; COV: compostos orgânicos voláteis.

Tabela 4 - Caracterização química em relação ao potencial fertilizante para o solo da matéria seca dos adubos orgânicos avaliados neste estudo.

	Unidade	Composto Orgânico Comercial	Lodo ETE Betim Central
Nitrato (como N)	mg kg ⁻¹	441,4	2,0
Nitrito (como N)	mg kg ⁻¹	1,0	0,9
Porcentagem de Sólidos	%	100,0	100,0
Sólidos Totais	%	691	97,7
Sólidos Voláteis	%	20,3	64,9
Zinco	mg kg ⁻¹	105,4	1.433,0
Crômio	mg kg ⁻¹	104,6	62,3
Molibdênio	mg kg ⁻¹	2,7	7,2
Potássio	mg kg ⁻¹	1.780,0	1.525,1
Sódio	mg kg ⁻¹	2.026,0	611,1
Cálcio	mg kg ⁻¹	7.0043,4	14.841,4
Fósforo	mg kg ⁻¹	4.703,3	16.172,0
Magnésio	mg kg ⁻¹	4.167,9	2.118,7
Nitrogênio Amoniacal	mg kg ⁻¹	21,9	334,7
Nitrogênio Total	mg kg ⁻¹	14.240,2	6.653,0
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg kg ⁻¹	14.095,5	6.468,8
N disponibilizável	mg kg ⁻¹	4.686,38	2.278,24
Matéria orgânica	%	26,4	62,1
Enxofre	mg kg ⁻¹	10.028,9	8.055,3

isso está associada à rápida degradação da MO lábil nas primeiras semanas após a incorporação do material orgânico no solo (Silva *et al.* 2019; Diniz *et al.*, 2019).

Os teores de MO nos solos e estéril apresentaram-se estatisticamente diferentes antes e depois da aplicação do lodo de esgoto sanitário e do composto orgânico comercial, e os valores mostraram-se superiores, na 1ª e 2ª coletas, em relação aos teores de MO naturalmente contidos no solo e estéril. Por outro lado, em relação à adubação química, não foram observadas diferenças significativas nos resultados em nenhuma das análises realizadas, conforme apresentado na Figura 1.

Não houve diferença estatística significativa nos resultados apresentados na 1ª e 2ª coletas em relação ao teor de MO nos solos e estéril tratados com lodo de esgoto e composto orgânico, o que mostra que a mineralização não foi suficiente para baixar esses teores nos 132 dias subsequentes à aplicação das adubações. De acordo com o teste Tukey, não houve efeito do tempo (época de coleta) no teor de MO nos solos e estéril avaliados.

Os macronutrientes N total, P, K e S disponíveis, Ca e Mg trocáveis foram avaliados nos solos e estéril depois de serem submetidos aos tratamentos de adubação, e os resultados estão apresentados na Tabela 5. Para os tratamentos com adubações orgânicas, observou-se aumento significativo de N total, P e K disponíveis e Ca trocável, nos solos/substratos, se comparados com os teores antes da aplicação dessas adubações e submetidos à fertilização mineral.

O teor de Mg trocável nos solos e estéril foi significativamente maior depois de efetuada a adubação com o composto orgânico, o que ficou constatado pelos resultados obtidos na 1ª coleta; entretanto, na 2ª coleta não houve diferença estatística significativa em comparação com o teor obtido nos solos e estéril que não receberam adubação.

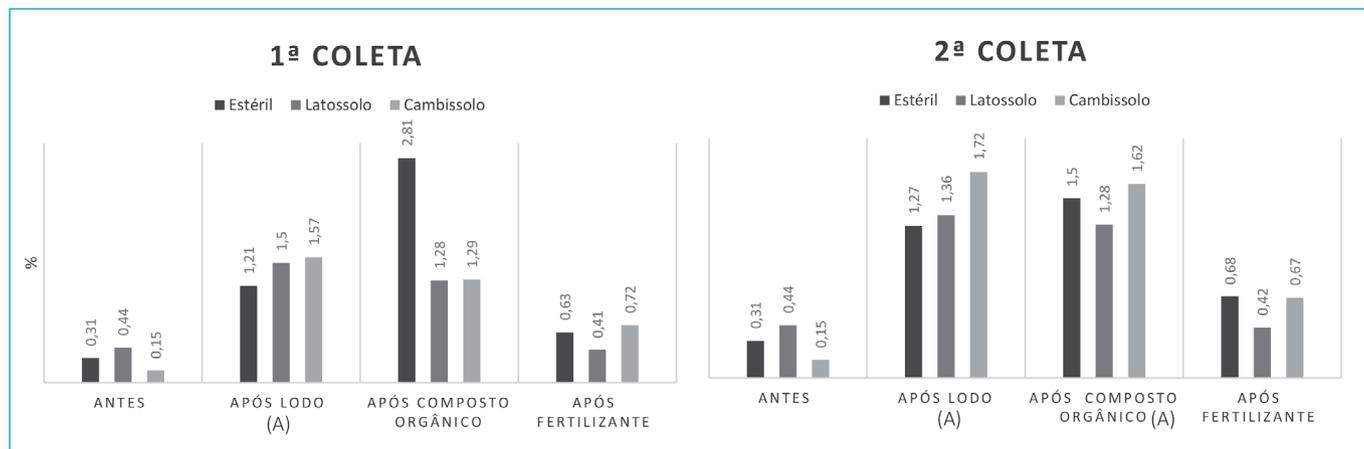


Figura 1 - Comparação dos teores de matéria orgânica nos solos e estéril antes e depois de efetuadas as adubações, em duas épocas de coleta (1ª e 2ª) de amostras.

Tabela 5 - Teores de macronutrientes nos solos/substrato depois de efetuadas as adubações.

Identificação da amostra		K	P	Ca	Mg	P-Rem	S	N Total	
		(mg dm ⁻³)	(cmol _c dm ⁻³)			(mg L ⁻¹)	(mg dm ⁻³)	(mg kg ⁻¹)	
Cambissolo (condição natural)		14,27	39,0	1,88	0,16	11,34	58,58	378,80	
Latossolo (condição natural)		20,48	93,64	1,13	0,35	32,3	23,12	529,0	
Estéril (condição natural)		18,41	11,55	0,92	0,18	7,84	57,8	494,2	
T2.1 - Lodo+Cambissolo	1ª Coleta	58,9	82,1	1,4	0,20	16,4	76,95	657	
T2.2 - Lodo+Latossolo		76,6	107,1	0,7	0,29	25,3	73,38	6807	
T2.3 - Lodo+Estéril		55,6	46,6	1,0	0,24	15,1	73,33	883	
Teste de Tukey-1ª Coleta		A							
T3.1 - Composto Org.+Cambissolo		137,2	44,2	4,3	0,36	11,0	66,15	952	
T3.2 - Composto Org.+Latossolo		62,5	54,0	3,5	0,24	17,7	73,56	310	
T3.3 - Composto Org.+Estéril		208,2	79,6	5,4	0,63	15,7	74,79	688	
Teste de Tukey-1ª Coleta		A		A	A				
T4.1 - Fert. Mineral+Cambissolo		52,0	30,2	1,5	0,16	8,8	69,57	136	
T4.2 - Fert. Mineral+Latossolo		55,3	20,1	1,0	0,17	12,6	69,11	138	
T4.3 - Fert. Mineral+Estéril		58,2	39,3	1,3	0,18	20,4	58,94	219	
Teste de Tukey-1ª Coleta		A						A	
T2.1 - Lodo+Cambissolo		2ª Coleta	9,2	19,7	1,1	0,12	6,4	78,28	452
T2.2 - Lodo+Latossolo			16,4	30,2	1,1	0,23	29,4	80,52	429
T2.3 - Lodo+Estéril	16,7		46,4	1,5	0,25	20,8	53,68	403	
Teste de Tukey-2ª Coleta	B								
T3.1 - Composto Org.+Cambissolo	51,0		36,9	5,7	0,27	12,4	31,96	705	
T3.2 - Composto Org.+Latossolo	79,8		21,6	5,6	0,33	26,0	49,79	428	
T3.3 - Composto Org.+Estéril	49,6		34,9	5,1	0,25	13,1	54,03	941	
Teste de Tukey-2ª Coleta				B					
T4.1 - Fert. Mineral+Cambissolo	14,0		17,6	1,5	0,14	4,9	93,58	134	
T4.2 - Fert. Mineral+Latossolo	17,4		5,3	0,9	0,12	12,8	119,91	79	
T4.3 - Fert. Mineral+Estéril	26,9	21,4	1,4	0,14	19,1	65,27	148		
Teste de Tukey-2ª Coleta	A						B		

Org.: Orgânico; Fert.: Fertilizante; K: potássio; P: fósforo; Ca: cálcio; Mg: magnésio; P-Rem: fósforo remanescente; S: enxofre; N: nitrogênio.

O composto orgânico apresenta pH superior ao dos demais adubos orgânicos em consequência da presença de resíduos alcalinos provenientes do processamento da celulose; e, segundo Tamanini (2004), o poder tampão do pH exerce influência sobre a disponibilidade do Mg, o que pode ter causado diminuição nos seus teores trocáveis nos materiais, na 2ª coleta. Os teores de Ca trocável nesse composto tiveram direta relação com o aumento no pH dos solos e estéril nos quais essa adubação foi aplicada. O teor de S disponível não foi significativamente diferente em nenhuma das coletas se comparado ao obtido nos solos e estéril antes da aplicação dessa adubação.

Comparando-se as amostras da 1ª e 2ª coletas das misturas de solo e estéril, observou-se decréscimo nos teores de P e K disponíveis o que pode ser atribuído à sua rápida absorção pelas plantas, uma vez que a vegetação plantada é de rápido crescimento, notadamente nos três primeiros meses após efetuada a semeadura.

O composto orgânico proporcionou a obtenção de teores maiores de Ca, Mg trocáveis e K disponível do que o lodo de esgoto. Por sua vez, os solos e o estéril adubados com lodo de esgoto sanitário apresentaram os maiores níveis de fósforo se comparados aos solos/substrato adubados com o composto orgânico e o fertilizante mineral.

O fertilizante mineral proporcionou teores de N inferiores aos disponibilizados pelo lodo de esgoto e composto orgânico nos solos e estéril estudados, fato que se deve à dose de aplicação de nitrogênio ser superior nas adubações orgânicas. Nota-se, também, que os teores de nitrogênio apresentaram decréscimo na 1ª e 2ª coletas nos solos adubados com fertilizante mineral, o que pode estar vinculado à intensa ocorrência de chuvas no intervalo de 75 dias entre a aplicação e a primeira coleta. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018), apenas nos dez dias que antecederam a 1ª coleta choveu 89,9 mm, índice significativo para o período de setembro a outubro. Já a redução de N observada após a aplicação do COC pode estar associada à maior absorção desse nutriente por parte das plantas, porém demais estudos devem ser realizados para melhores constatações.

O fósforo remanescente (P-Rem), que dá indicativo da disponibilidade do P depois de interagir com a fração sólida dos solos e estéril, não apresentou diferenças em relação aos tipos de adubação realizados; entretanto, foi menor no Cambissolo que no Latossolo e estéril. Isso indica que o material do Cambissolo foi mais efetivo na adsorção de P que os outros, o que foi inesperado, já que o Latossolo, por possuir textura mais argilosa, tem maior propensão a adsorver P (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Além dos teores de nutrientes, alterações químicas e físico-químicas são de grande importância em solos receptores de materiais orgânicos. Os resultados de T (CTC a pH 7), t (CTC efetiva ou a pH do solo), V% (índice de saturação por bases), m% (índice de saturação por alumínio), Al^{3+} e H+Al estão apresentados na Tabela 6.

Após a aplicação dos adubos orgânicos, observou-se aumento na CTC efetiva e potencial, o que maximizou a capacidade dos materiais do Latossolo, Cambissolo e estéril em armazenar cátions e água. Além disso, houve neles melhoria nos índices de saturação por bases, o qual apresentou valores maiores que 60% em 61% das análises, o que indica a elevação no nível de bases passíveis de troca no solo com a utilização das adubações.

A determinação do percentual de saturação por bases é importante para avaliar o nível de fertilidade do solo, uma vez que eles são considerados eutróficos quando $V > 50\%$, ao deterem maior quantidade de cátions básicos Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , os quais permanecem adsorvidos aos colóides do solo (RONQUIM,

2010). O aumento na soma de bases ocorreu em contraposição à redução nos teores de acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (m%).

Os teores de Al^{3+} nas amostras permaneceram constantes nos solos e no estéril antes e depois de efetuadas as adubações. Os teores obtidos em todas as coletas foram próximos de zero, sendo os maiores valores ($0,03 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) observados nas amostras de Latossolo. Para a fertilidade do solo, baixos teores de Al^{3+} são um resultado positivo, já que altos teores desse elemento podem comprometer o desenvolvimento radicular e, com isso, diminuir a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas (MIGUEL *et al.*, 2010).

Com base no teor de Al^{3+} , calculou-se o percentual de saturação por alumínio (m%), pelo qual se avalia a toxicidade por esse elemento químico. Foram observados valores de m% menores, tanto na 1ª como na 2ª coleta de amostras dos solos e estéril, quando comparados aos valores obtidos antes das adubações. Destaca-se que todos os teores de m% ficaram inferiores a 15%, considerados níveis baixos, segundo dados do Ribeiro *et al.* (1999). Os maiores valores foram encontrados no Latossolo receptor do fertilizante químico e do lodo de esgoto sanitário, com 3,24 e 2,38%, respectivamente.

Em relação ao pH (acidez ativa), os solos e estéril nos quais foi incorporado o composto orgânico apresentaram os maiores valores, o que se entende ser decorrente da presença de resíduos alcalinos na sua constituição.

A acidez potencial (H + Al) reduziu-se, em todas as análises realizadas, nas duas coletas após a aplicação do composto orgânico e do lodo de esgoto, sendo a adubação com composto orgânico a que proporcionou os menores índices. Tal redução pode ser creditada ao aumento no teor de MO, que tem relação direta com essa propriedade química do solo (MACHADO *et al.*, 2014). Importante frisar que todos os resultados se encontraram em níveis considerados baixos segundo Ribeiro *et al.* (1999), e que essa redução observada é um fator interessante, já que implica o aumento do poder tampão do solo.

Tendo em vista a importância dos micronutrientes para o desenvolvimento e crescimento dos vegetais, assim como os seus riscos à saúde humana e ao meio ambiente, foram realizadas análises das suas concentrações após a aplicação dos adubos. Na Tabela 7 estão apresentados os valores encontrados para os micronutrientes e metais avaliados nas misturas de solos e estéril mais adubos.

Os teores totais de Fe, Mn, Cu e Zn nos solos e estéril aumentaram depois de efetuadas as adubações com composto orgânico e lodo de esgoto sanitário, o que proporcionou, em consequência, o aporte de micronutrientes benéficos aos materiais.

Já os teores de boro nos solos/substrato não se alteraram em nenhuma das coletas, se comparados com os obtidos anteriormente à aplicação do composto orgânico, do lodo de esgoto e do fertilizante mineral, o que significa que nenhum dos adubos foi fonte desse micronutriente para os materiais avaliados. O zinco e o cobre, se presentes em teores elevados, podem ser fitotóxicos, sendo prejudiciais a toda cadeia que se alimente da vegetação que os absorva em excesso. Por isso, em todos os países onde o lodo de esgoto é aplicado no solo existem normas que estabelecem as suas concentrações permitidas e o teor máximo acumulado no solo. Na Resolução CONAMA 420/2009 (BRASIL, 2009), legislação que dispõe sobre valores e critérios orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas, não estão estabelecidos teores limitantes para B, Mn e Fe no solo, constando-os apenas para Zn e Cu, os quais se encontraram em teores muito inferiores aos máximos estabelecidos tanto no lodo como no composto orgânico. Já na Resolução CONAMA 375/2006, a qual define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos

Tabela 6 – Características químicas e físico-químicas médias de fertilidade dos solos e estéril, depois de efetuadas as adubações.

		Al	H+Al	t	T	V	m
		cmol _c dm ⁻³			%	%	
Cambissolo (condição natural)		0,02	1,05	2,1	-	66	-
Latossolo (condição natural)		0,02	1,16	1,55	-	56	-
Estéril (condição natural)		0,03	1,56	1,18	-	42	-
T2.1 - Lodo+Cambissolo	1ª Coleta	0,02	0,95	1,76	2,69	62,62	1,26
T2.2 - Lodo+Latossolo		0,03	1,05	1,22	2,25	52,27	2,38
T2.3 - Lodo+Estéril		0,02	0,91	1,41	2,30	60,38	1,44
Teste de Tukey - 1ª Coleta					A		A
T3.1 - Composto Org. +Cambissolo		0,01	0,82	5,04	5,85	85,64	0,23
T3.2 - Composto Org.+Latossolo		0,01	0,91	3,87	4,77	72,52	0,77
T3.3 - Composto Org.+Estéril		0,01	0,93	6,59	7,51	86,20	0,16
Teste de Tukey - 1ª Coleta		A		A	A	A	A
T4.1 - Fert. Mineral+Cambissolo		0,02	0,99	1,79	2,77	62,50	1,23
T4.2 - Fert. Mineral+Latossolo		0,03	1,10	1,38	2,45	54,85	1,93
T4.3 - Fert. Mineral+Estéril		0,02	1,28	1,64	2,90	53,24	1,46
Teste de Tukey - 1ª Coleta					A		A
T2.1 - Lodo+Cambissolo		2ª Coleta	0,02	0,88	1,31	2,18	59,28
T2.2 - Lodo+Latossolo	0,03		1,04	1,36	2,37	55,23	2,21
T2.3 - Lodo+Estéril	0,02		1,33	1,86	3,16	57,82	1,31
Teste de Tukey-2ª Coleta					A		A
T3 - 1 Composto Org. +Cambissolo	0,01		0,70	6,10	6,80	89,69	0,10
T3 - 2 Composto Org.+Latossolo	0,01		0,73	6,10	6,82	86,84	0,12
T3 - 3 Composto Org.+Estéril	0,01		0,76	5,49	6,25	87,35	0,15
Teste de Tukey - 2ª Coleta	A		A	B	A	B	A
T4 - 1 Fert. Mineral+ambissolo	0,01		0,79	1,65	2,43	66,90	0,74
T4 - 2 Fert. Mineral +Latossolo	0,03		0,93	1,09	1,99	51,71	3,24
T4 - 3 Fert. Mineral+Estéril	0,01		1,01	1,60	2,60	59,37	0,70
Teste de Tukey - 2ª Coleta					A		A

Org.: Orgânico; Fert.: Fertilizante; t: Capacidade de troca catiônica efetiva; T: Capacidade de troca catiônica potencial; V: saturação por bases; m: Saturação por Alumínio. As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

de esgotos, estão estabelecidos os limites para os compostos Cu (68,5 mg kg⁻¹) e Zn (225,5 mg kg⁻¹). Na 1ª coleta, os teores totais de Cu e Zn nos materiais em que foi incorporado o lodo de esgoto sanitário foram, respectivamente, de 3,11 mg kg⁻¹ e 26,97 mg kg⁻¹, enquanto na 2ª coleta foram de 1,98 mg kg⁻¹ e 18,31 mg kg⁻¹. Na 1ª coleta, os teores totais de Cu e Zn nos materiais em que foi incorporado o composto orgânico comercial foram, respectivamente, de 0,76 mg kg⁻¹ e 6,02 mg kg⁻¹, enquanto na 2ª coleta foram de 1,57 mg kg⁻¹ e 15,53 mg kg⁻¹. Na comparação apresentada, observa-se que os teores de micronutrientes nos solos e estéril se apresentaram abaixo dos limites máximos considerados aceitáveis pela legislação, e as adubações orgânicas avaliadas não proporcionaram riscos na sua utilização, constituindo até mesmo importante fonte de micronutrientes para o sistema solo-planta.

No tocante à influência da disponibilização de metais nos solos/substrato, observou-se que a aplicação de elevadas doses de lodo de esgoto sanitário nos solos e estéril não provocou aumento nos teores de metais, uma vez que tais elementos químicos permaneceram abaixo do estipulado pela Resolução CONAMA

375/2006 (BRASIL, 2009), conforme apresentado na Tabela 8. Destacou-se, ainda, que os adubos aplicados não proporcionaram diferenças significativas entre si.

Com a aplicação de todos os adubos, os teores totais de Ni e Cr nos solos e estéril apresentaram pequena tendência de aumento nas duas coletas amostradas, enquanto os de Cd e Pb apresentaram tal tendência apenas em uma das coletas (o Cd na 2ª e o Pb na 1ª). Em vista da baixa mobilidade desses metais no solo, não seriam de se esperar consideráveis alterações nos teores totais de Cd e Pb no solo.

Os teores de metais pesados nos solos e estéril receptores do composto orgânico apresentaram os maiores níveis médios em relação aos das outras adubações. Entretanto, esses teores estão muito abaixo dos limites máximos estabelecidos na Resolução CONAMA 420/2009, embora, se comparados com as cargas acumuladas de substâncias inorgânicas aceitas no solo, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006, fiquem próximos aos valores máximos permitidos.

Apesar da Resolução CONAMA 375/2006 ser específica para a aplicação do lodo de esgoto na agricultura, não é uma exigência legal para a recuperação de áreas degradadas nem para adubações como o composto orgânico. Assim, tais

Tabela 7 - Teores totais de micronutrientes nos solos e estéril depois de efetuadas as adubações.

		Zn	Fe	Mn	Cu	B	Ni	Cr	Cd	Pb
		mg dm ⁻³					mg kg ⁻¹			
Cambissolo (condição natural)		416	69,72	146,0	1,15	0,07	15	30	0,1	31
Latossolo (condição natural)		3,01	58,54	120,0	0,94	0,16	38	18	0,5	15
Estéril (condição natural)		1,95	62,49	108,0	0,8	0,03	46	49	0,4	18
T2.1 - Lodo+Cambissolo	1ª Coleta	22,40	139,53	131,11	3,11	0,23	8,19	29,21	0,79	13,45
T2.2 - Lodo+Latossolo		26,97	95,40	108,30	1,39	0,07	6,99	26,65	0,51	15,72
T2.3 - Lodo+Estéril		12,97	131,23	392,00	1,55	0,09	9,09	16,18	1,21	17,98
Teste de Tukey-1ª Coleta		A	A				A		A	
T3.1 - Composto Org.+Cambissolo		4,55	135,9	140,08	0,76	0,14	6,14	27,23	0,62	10,7
T3.2 - Composto Org.+Latossolo		6,02	119,4	185,35	0,20	0,16	9,86	73,52	1,81	21,00
T3.3 - Composto Org.+Estéril		5,40	135,09	258,23	0,56	0,23	8,84	10,37	0,94	17,75
Teste de Tukey - 1ª Coleta			A		A		A		A	
T4.1 - Fert. Mineral+Cambissolo		2,66	58,79	59,88	0,32	0,07	7,76	24,38	0,69	11,53
T4.2 - Fert. Mineral+Latossolo		0,65	48,08	28,23	0,14	0,15	6,55	34,20	0,51	15,22
T4.3 - Fert. Mineral+Estéril		1,32	51,16	107,49	3,08	0,12	6,63	10,43	0,53	10,71
Teste de Tukey - 1ª Coleta				A	A			A		A
T2.1 - Lodo+Cambissolo	2ª Coleta	2,03	136,9	157,52	0,80	0,15	4,23	31,86	0,05	13,03
T2.2 - Lodo+Latossolo		18,31	184,68	253,81	1,98	0,04	7,62	30,07	0,05	15,61
T2.3 - Lodo+Estéril		18,05	195,6	431,10	1,94	0,05	7,59	10,24	0,26	13,86
Teste de Tukey - 2ª Coleta				A				A		A
T3 - 1 Composto Org.+Cambissolo		3,79	174,5	250,34	1,07	0,01	4,71	30,39	0,06	12,22
T3 - 2 Composto Org.+Latossolo		15,53	155,56	123,75	1,57	0,06	5,80	33,46	0,05	16,38
T3 - 3 Composto Org.+Estéril		2,66	173,0	262,91	1,22	0,09	5,94	9,49	0,23	12,85
Teste de Tukey - 2ª Coleta				A		A		A		A
T4 - 1 Fert. Mineral+Cambissolo		1,61	118,7	153,33	0,64	0,14	3,26	26,39	0,07	11,60
T4 - 2 Fert. Mineral+Latossolo		7,67	137,08	155,09	3,12	0,07	6,01	33,00	0,02	12,89
T4 - 3 Fert. Mineral+Estéril		4,98	138,5	184,17	1,04	0,09	6,10	9,43	0,17	10,79
Teste de Tukey - 2ª Coleta				A	A			A		A

Org.: Orgânico; Fert.: Fertilizante.

Tabela 8 - Limites máximos estabelecidos para os teores de metais pesados.

	Unidades	CONAMA 375	COC	LE
Cd	mg kg ⁻¹	39	0,1	1,1
Pb	mg kg ⁻¹	300	14,6	33,4
Cu	mg kg ⁻¹	1500	49,6	189,4
Ni	mg kg ⁻¹	420	20,7	33,3
Zn	mg kg ⁻¹	2.800	105,4	1.433,0
Cr	mg kg ⁻¹	1.000	104,6	62,3

CONAMA: Conselho nacional do meio ambiente; COC: composto orgânico comercial; LE: lodo de esgoto sanitário.

dados servem de alerta para a importância de uma análise das quantidades desses elementos químicos a serem aplicadas nas demais adubações orgânicas, a fim de garantir que seus teores totais acumulados permaneçam em níveis ambientalmente seguros no solo.

Torna-se importante destacar que a MO proporcionada pelas adubações orgânicas ajuda na retenção desses metais no meio, o que reduz a sua

mobilidade e, conseqüentemente, as perdas por lixiviação e escoamento superficial (CAMPOS, 2010). Joris *et al.* (2012), em estudo da adsorção de metais pesados depois de efetuada a calagem superficial em um Latossolo Vermelho, observaram comportamento semelhante: baixa disponibilidade de Cu, Zn, Cr e Zr no solo.

Em relação à presença de patógenos, o lodo de esgoto sanitário apresentou ovos viáveis de helmintos abaixo de 0,25 ovo g⁻¹ de sólidos totais, valor de referência estabelecido pela Resolução CONAMA 375/06 (BRASIL, 2009). Isso é de extrema relevância para a segurança sanitária, pois diminuirá os riscos de contaminação na operação e no manuseio desse resíduo. Além disso, sua incorporação aos solos e estéril proporcionou diluições da ordem de 33 a 40 vezes; há de se convir que os riscos sanitários são ainda mais minimizados.

A baixa concentração de ovos viáveis de helmintos no lodo pode ser atribuída à forma de tratamento deste na ETE Betim Central, que passa por uma câmara de secagem térmica, chegando à temperatura de, aproximadamente, 900 °C. Segundo a classificação de requisitos mínimos para uso de lodos de esgoto presente na legislação supracitada, o lodo utilizado no estudo é de classe

A, o que o torna passível de ser utilizado com fins agrícolas. Como o composto orgânico foi constituído por resíduos de origem vegetal e do processo de produção da celulose, os ovos viáveis de helmintos não são microrganismos normalmente encontrados nesses insumos.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir:

A incorporação de lodo de esgoto sanitário e compostos orgânicos foi capaz de aumentar apreciavelmente os teores de MO e a fertilidade, em geral, dos solos e estéril receptores.

A incorporação de adubos orgânicos proporcionou diminuição na toxicidade dos solos e estéril às plantas e aumento na saturação de bases nos solos e estéril avaliados, tornando-os eutróficos.

Os teores de metais pesados no Latossolo, Cambissolo e estéril, após a aplicação de lodo de esgoto sanitário, apresentaram conformidade com as Resoluções CONAMA 420/2009 e 375/2006.

A adição de lodo de esgoto sanitário proporcionou qualidade sanitária aos solos e estéril, tomando-se como referência apenas a análise da presença de ovos viáveis de helmintos.

Confirmou-se a viabilidade ambiental da aplicação de lodo de esgoto sanitário em substituição ao composto orgânico comercial na recuperação de áreas degradadas do Quadrilátero Ferrífero/MG.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio prestado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a empresa VALE pelos recursos financeiros.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Guimarães, R.: Curadoria de Dados, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Recursos, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Matos, A.: Metodologia, Análise Formal, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Carpanezi, T.: Conceituação, Análise Formal, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B.S.Q.; ZELEYA, K.P.S.; COLEN, F.; FRAZÃO, L.A.; NAPOLI, A.; PARIKH, S.J.; FERNANDES, L.A. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. *Pedosphere*, v. 31, n. 4, p. 572-582, 2021. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60003-6)
- AGBOOLA, O.; BABATUNDE, D.E.; FAYOMI, O.S.I.; SADIKU, E.R.; POPOOLA, P.; MOROPENG, L.; YAHAYA, A.; MAMUDU, O.A. A review on the impact of mining operation: Monitoring, assessment and management. *Results in Engineering*, v.8, p. 100181, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100181>
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2009. 20p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em: 01 maio 2017.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2006. 32p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2016.
- CAMPOS, M.C.C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. *Revista Ambientia*, v. 6, n. 3, p.547-565, 2010.
- CAVALCANTI, J.V.F.L.; FRAGA, T.J.M.; LEITE, M.A.L.; SILVA, D.F.S.; LIMA, V.F.; SCHULER, A.R.P.; NASCIMENTO, C.W.A.; MOTTA SOBRINHO, M.A. In-depth investigation of Sodium percarbonate as oxidant of PAHs from soil contaminated with diesel oil. *Environmental pollution*, v. 268, n. Pt B, p. 115832, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115832>
- CLIMATE. *Clima São Sebastião das Águas Claras*. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/sao-sebastiao-das-aguas-claras-675568/>> Acesso em: 07/06/2020.
- DINIZ, I.C.; MATOS, A.T.; MATOS, M.P.; BORGES, A.C.; WILKEN, A. Degradation rate of limed sewage sludge in an agricultural soil. *Environmental Engineering and Management Journal*, v. 18, n. 5, p. 1049-1055, 2019. <https://doi.org/10.30638/eemj.2019101>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017. 577p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212p.
- FRANK, W. Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, v.1, p.80-83 1945. <https://doi.org/10.2307/3001968>
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Estações Automáticas*. Disponível em: < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf >. Acesso em: 10 mar. 2018.
- JORIS, H.A.W.; FONSECA, A.F.; ASAMI, V.Y.; BRIEDIS, C.; BORSZOWSKI, P.R.; GARBUIO, F.J. Adsorção de metais pesados após calagem superficial em um Latossolo Vermelho sob sistema de plantio direto. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, n. 1, p. 1-10, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rca/v43n1/01.pdf>> Acesso em: 09 jun. 2020.

- LIU, X.B.; ZHANG, X.Y.; WANG, Y.X.; SUI, Y.Y.; ZHANG, S.L.; HERBERT, S.J.; DING, G. Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China. *Plant, Soil and Environment*, v.56, n. 2, p.87-97, 2010. <https://doi.org/10.17221/155/2009-PSE>
- MACHADO, L.V.; RANGEL, O.J.P.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, R.V.; FERRARI, J.L. Fertilidade e Compartilhamentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Coffee Science*, Lavras, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8053>> Acesso em: 09 jun. 2020.
- MATOS, A.T. *Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos*. 1. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2014. 240p
- MARTINS, S.V. *Recuperação de áreas degradadas - ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração*. 4. ed. Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 2017. 266p.
- MESQUITA, G.R.A.; RANDOW, J.R.V.; OLIVEIRA, R.L.; GONÇALVES, M.V.A. Viabilidade do lodo de esgoto na agricultura. *Revista Perspectivas Online. Ciências Exatas e Engenharia*. Campos Goytacazes, Rio de Janeiro, v. 17, n. 07, p. 80-87, 2017.
- MIGUEL, P.S.B.; GOMES, F.T.; ROCHA, W.S.D.; CARVALHO, C.A.; OLIVEIRA, A.V. Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas e controles genéticos. *CES Revista*, v. 24, n. 1, p. 11-30, 2010. Disponível em <<https://seer.cesjfbr/index.php/cesRevista/article/view/661>> Acesso em: 10/11/2019.
- NASCIMENTO, A.L.; SAMPAIO, R.A.; CRUZ, S.F.; ZUBA, G.R.; BARBOSA, C.F.; LIMA, N.N.; FERNANDES, L. Metais pesados em girassol adubado com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.18, n. 7, p.694-699, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000700004>
- NURZHANOVA, A.; PIDLISNYUK, V.; ABIT, K.; NURZHANOV, C.; KENESSPV, B.; STEFANOVSKA, T.; ERICKSON, L. Comparative assessment of using *Miscanthus x giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: a case of military and mining site. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 13, p. 13320-13333, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04707-z>
- OLIVEIRA, C.M.B.; GATIBONI, L.C.; MIQUELLUTI, D.J.; SMYTH, T.J.; ALMEIDA, J.A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo Langmuir. *Revista Brasileira de Ciência e Solos*, v. 38, n. 6, p. 1805-1815, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600015>
- PAUL, B.K.; VANLAUWE, B.; AYUKE, F.; GASSNER, A.; HOOGMOED, M.; HURISSO, T.T.; KOALA, S.; LELEI, D.; NDABAMENYE, T.; SIX, J.; PULLEMAN, M.M. Mediumterm impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. v. 164, 1, p. 14-22, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.003>
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ, V.V.H. *Recomendações para uso e fertilizantes em Minas Gerais*. 5. ed. Viçosa, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- RONQUIM, C.C. *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais*. 1. ed. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 30p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>>. Acesso: 01/06/2020.
- SILVA, D.A.P.; MATOS A.T.; MATOS, M.P. Mineralization of organic matter and productivity of tifton 85 grass (*Cynodon spp*) in soil incorporated with stabilized sludge from a vertical flow constructed wetland. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 9, n. 2, p. 309-318, 2019.
- SÁNCHEZ, L. E. *Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 496p.
- TAMANINI, C.R. *Recuperação áreas degradadas com a utilização de biossólido e gramínea forrageira*. 196p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- TEIXEIRA, M.C.; SANTOS, A.C.; FERNANDES, C.S.; NG, J.C. Arsenic contamination assessment in Brasil – Past, presente and future concerns: a historical and critical review. *Science of the total environment*, v. 730, p. 138217, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138217>
- TUKEY, J. W. *Exploratory data analysis*. 1. ed. Londres: Editora Pearson, 1977. 688p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under*. EPA 40 CFR part 503, Washington, 1992.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Land application of biossolids: process design manual*. EPA 40 CFR part 503, Washington, 1997.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge*. Code of Federal Regulation, Title 40, EPA 40 CFR Part 503, Washington, 1993
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Sludge Treatment and Disposal*. v. 1 e 2, EPA 40 CFR Part 503. Cincinnati: USEPA, 1979.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge, including domestic septage, under 40 CFR part 503: environmental regulations and technology*. EPA/625/R-92/013, U.S. Environmental Protection Agency, Ohio: USEPA, 2003. 186p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *Method 3051A - Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils*. Washington: USEPA 2007. 30p.