

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

JONAS PEREIRA PONTES

**QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Urochloa brizantha* cv.
Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E
KCI**

MONTES CLAROS
Janeiro 2022

Jonas Pereira Pontes

**QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Urochloa brizantha* cv.
Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E
KCI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Produção Vegetal, da Universidade Federal de Minas Gerais,
como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em
Produção Vegetal.

Orientador: Cândido Alves da Costa

Coorientador: Regynaldo Arruda Sampaio

MONTES CLAROS

Janeiro 2022

Pontes, Jonas Pereira.

P813q
2022

Qualidade agrônômica do lodo de esgoto cultivado com *urochloa brizantha* cv. marandu na presença de acelerador de compostagem, superfosfato simples e kcl. [manuscrito] / Jonas Pereira Pontes. Montes Claros, 2022.
54 f. : il.

Dissertação - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Cândido Alves da Costa.

Banca examinadora: Luiz Arnaldo Fernandes, Fabíola Mendes Braga, Reginaldo Arruda Sampaio.

Inclui referências: f. 17-22; 48-53.

1. Fertilizantes orgânicos. 2. Lodo de esgoto. 3. Resíduos. I. Costa, Cândido Alves da. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 628.4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 21 dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e dois, às 8:30 horas, sob a Presidência do Professor Cândido Alves da Costa, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Reginaldo Arruda Sampaio, D. Sc. (Coorientador - UFMG/ICA), Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (UFMG/ICA) e de Fabíola Mendes Braga, D. Sc. (Instituto Federal Sudeste de MG/Rio Pomba), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de **JONAS PEREIRA PONTES**, aluno do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. Após avaliação da defesa de Dissertação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa de Dissertação intitulada: **"QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Urochloa brizantha* cv. Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E KCI"**, sendo o aluno considerado APROVADO. E, para constar, eu, Professor Cândido Alves da Costa, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Mestrado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 21 de janeiro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Candido Alves da Costa, Professor do Magistério Superior**, em 21/01/2022, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Arnaldo Fernandes, Servidor(a)**, em 21/01/2022, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabíola Mendes Braga, Usuária Externa**, em 21/01/2022, às 09:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo Arruda Sampaio, Professor do Magistério Superior**, em 21/01/2022, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço a Deus por ter me guiado nas dificuldades e me abençoado todos os dias.

A meus pais Gonçalo e Kátia que me apoiaram, me incentivaram e mesmo distantes de mim foram o meu suporte. Agradeço ao meu irmão Lucas, aos meus familiares tios, tias, primos e avós pela confiança depositada em mim.

A minha namorada Rejanne, e a sua família por todo amor, carinho e apoio.

Aos professores Cândido Alves da Costa e Regynaldo Arruda Sampaio pelas oportunidades oferecidas e ao conhecimento repassado, a compreensão, paciência, amizade e a ajuda de extrema importância para a conclusão dessa etapa.

Aos meus amigos Fernanda, Gustavo e Rayane, pela sua amizade, companheirismo e por todo a ajuda que me deram durante esta jornada.

Aos colegas de trabalho em laboratório Adelaine e Márcio muito obrigado por todo conhecimento repassado e pela colaboração na execução dos experimentos.

os membros da Igreja Batista Remidos por Cristo pelas orações.

À Fabíola e ao professor Luiz Arnaldo por terem disponibilizado um tempo para comporem a banca avaliadora e pelas contribuições ao trabalho.

A CAPES e á FAPEMIG pela bolsa e apoio financeiro, para a realização deste trabalho e à COPASA-MG pela disponibilização do lodo de esgoto.

Ao ICA/UFMG, pelo conhecimento repassado, por meio do corpo docente e dos funcionários.

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

Muito obrigado!

QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Urochloa brizantha* cv. Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E KCl
RESUMO:

O lodo de esgoto é um resíduo proveniente das estações de tratamentos de esgotos com enorme potencial para uso como fertilizante orgânico. Todavia, necessita de processo de estabilização, para fins de eliminar o odor e a atração de vetores de moléstias e organismos nocivos. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha* cv. Marandu na presença e ausência de acelerador de compostagem (AC), superfosfato simples (SS) e KCl, para posterior uso como fertilizante orgânico. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, distribuídos em esquema fatorial 2^3 , correspondendo a presença e ausência de acelerador de compostagem (0 e 30,7 L t⁻¹), duas doses de superfosfato simples (SS) (0 e 6 kg t⁻¹ de P₂O₅) e duas doses de KCl (0 e 3,6 kg t⁻¹ de K₂O). Foram utilizados sacos de aniagem de 30 litros para o acondicionamento do lodo de esgoto, estabelecendo-se uma camada de 30 cm de altura, semeada com 100 sementes de *U. brizantha* por m², mantendo-se, após o desbaste, 18 plantas por m², com período de cultivo de 90 dias. Nas análises de matéria seca da parte aérea (PA), raiz (RZ), matéria seca total (MT) e relação PA/RZ os melhores resultados foram aqueles que tiveram aplicação de P₂O₅ e K₂O. Avaliando os teores de C orgânico e N, ambos atenderam as exigências da legislação para fins de registro do produto como fertilizante orgânico. Observando os valores de relação C/N e pH-H₂O, em função das aplicações do AC e das doses de SS e KCl, a relação C/N aumentou com a aplicação de adubo fosfatado. O pH do lodo de esgoto aumentou com a aplicação de adubo potássico. Tanto a CTC quanto a relação CTC/C não foram influenciados pelos tratamentos. Pelo exposto, verificou-se que as adubações com SS ou KCl favoreceram a produção de biomassa da gramínea e que o AC praticamente não teve eficácia sobre essa variável e também sobre os atributos do lodo de esgoto. De todo modo, o lodo de esgoto cultivado com a gramínea apresentou atributos agrônômicos dentro dos limites exigidos para registro como fertilizante pela legislação específica, apresentando-se como um fertilizante orgânico de qualidade para uso no cultivo de plantas.

Palavras-chave: Biossólido; Fertilizante orgânico; Reciclagem de resíduos.

AGRONOMIC QUALITY OF SEWER SLUDGE CULTIVATED WITH *Urochloa brizantha* cv. Marandu IN THE PRESENCE OF COMPOSTING ACCELERATOR, SIMPLE SUPERPHOSPHATE AND KCl

ABSTRACT

Sewage sludge is a waste from sewage treatment plants with enormous potential for use as an organic fertilizer. However, it needs a stabilization process, in order to eliminate the odor and attract disease vectors and harmful organisms. Given the above, the objective of this work was to evaluate the sewage sludge cultivated with *Urochloa brizantha* cv. Marandu in the presence and absence of composting accelerator (CA), simple superphosphate (SS) and KCl, for later use as an organic fertilizer. The experiment was carried out in a randomized block design, with four replications, distributed in a 2^3 factorial scheme, corresponding to the presence and absence of composting accelerator (0 and 30.7 L t⁻¹), two doses of simple superphosphate (SS) (0 and 6 kg t⁻¹ of P₂O₅) and two doses of KCl (0 and 3.6 kg t⁻¹ of K₂O). Lineage bags of 30 liters were used for the packaging of sewage sludge, establishing a layer of 30 cm in height and sown with 100 seeds of *U. brizantha* per m², maintaining after thinning 18 plants per m², with 90-day growing period. In the analysis of shoot dry matter (PA), root (RZ), total dry matter (MT) and PA/RZ ratio, the best results were those that had applied P₂O₅ and K₂O. Assessing the levels of organic C and N, both met the requirements of the legislation for the purpose of registering the product as an organic fertilizer. Observing the values of C/N and pH-H₂O, as a function of CA applications and doses of SS and KCl, the C/N ratio increased with the application of phosphate fertilizer. The pH of sewage sludge increased with the application of potassium fertilizer. Both CTC and CTC/C ratio were not influenced by the treatments. From the above, it was found that fertilization with SS or KCl favored the production of grass biomass and that CA was practically ineffective on this variable and also on the attributes of sewage sludge. In any case, the sewage sludge cultivated with the grass presented agronomic attributes within the limits required for registration as a fertilizer by specific legislation, presenting itself as a quality organic fertilizer for use in plant cultivation.

Keywords: Biosolid; Organic fertilizer; Waste recycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO - QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO APÓS CULTIVO COM *Urochloa brizantha* cv. Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E KCl.

Figura 1-Vista dos sacos preenchidos com o lodo (esquerda). Vista dos sacos com o espaçamento de 1 metro (direita).	27
Figura 2- Inoculação do lodo com o acelerador de compostagem.	28
Figura 3- Início da germinação das sementes de <i>Urochloa</i>	29
Figura 4- Coleta das amostras.	29

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1- REMEDIAÇÃO DE LODO DE ESGOTO A PARTIR DO CULTIVO COM *Urochloa brizantha* cv. Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E KCl.

Tabela 1– Produção de matéria seca da parte aérea da <i>Urochloa brizantha</i> (PA), da raiz (RZ) e total (MT), e relação PA/RZ, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P_2O_5) e cloreto de potássio (K_2O)	31
Tabela 2– Teores totais de C orgânico, N, P e K no lodo de esgoto cultivado com <i>Urochloa brizantha</i> , em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P_2O_5) e cloreto de potássio (K_2O)	33
Tabela 3– Teores totais de Ca, Mg e S no lodo de esgoto cultivado com <i>Urochloa brizantha</i> , em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P_2O_5) e cloreto de potássio (K_2O)	35
Tabela 4– Teores totais ($mg\ kg^{-1}$) de Cu, Zn e Pb no lodo de esgoto cultivado com <i>Urochloa brizantha</i> , em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P_2O_5) e cloreto de potássio (K_2O).	36
Tabela 5– Valores de relação C/N, pH- H_2O , CTC, relação CTC/C e condutividade elétrica (CE) no lodo de esgoto cultivado, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P_2O_5) e cloreto de potássio (K_2O)	38

LISTA DE ABREVIATURAS

AC- Acelerador de Compostagem
ANOVA – Análise de Variância
CE – Condutividade Elétrica
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CTC – Capacidade de Troca Catiônica
DBC – Delineamento em Blocos Casualizados
DC – Dias de Cultivo
EM – Microrganismos Eficazes
ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICA – Instituto de Ciências Agrárias
IN – Instrução Normativa
KCl – Cloreto de Potássio
LE – Lodo de Esgoto
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MO – Matéria Orgânica
MSPA – Matéria Seca Parte Aérea
MSR – Matéria Seca Sistema Radicular
MST – Matéria Seca Total
ONU – Organização das Nações Unidas
PA – Parte Aérea
PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
SINIS – Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 Lodo de esgoto	14
3.2 Uso do lodo de esgoto na agricultura	14
3.3 Impacto do uso do lodo de esgoto na agricultura e processo de biorremediação	15
3.4 Uso da <i>Urochloa brizantha</i> na descontaminação de substratos contaminados.....	16
3.5 Referências.....	17
4. ARTIGO - QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E KCl.....	23
4.1 Introdução.....	26
4.2 Material e métodos	27
4.3 Resultados.....	30
4.4 Discussão	39
4.4.1 Influência do lodo de esgoto com e sem aditivos (AC, P ₂ O ₅ e K ₂ O) no crescimento de <i>Urochloa brizantha</i>	39
4.4.2 Influência do cultivo de <i>Urochloa brizantha</i> no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P ₂ O ₅ e K ₂ O), em relação aos teores totais de macronutrientes primários.	41
4.4.3 Influência do cultivo de <i>Urochloa brizantha</i> no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P ₂ O ₅ e K ₂ O), em relação aos teores totais de macronutrientes secundários.	42
4.4.4 Influência do cultivo de <i>Urochloa brizantha</i> no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P ₂ O ₅ e K ₂ O), em relação aos teores totais de metais pesados.....	43
4.4.5 Influência do cultivo de <i>Urochloa brizantha</i> no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P ₂ O ₅ e K ₂ O), em relação aos atributos químicos.....	45
4.5 Conclusões	47
4.6 Referências.....	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento, 45% do esgoto coletado no Brasil é tratado e devolvido adequadamente a natureza. Por outro lado, 55% do esgoto coletado é descartado na natureza sem tratamento, gerando contaminações e danos ao meio ambiente (BRASIL, 2016). Estudos da ONU estimam que em 2050 a população mundial atingirá 9,6 bilhões de pessoas, o que consistirá numa produção insustentável de resíduos para o planeta (ONU, 2013).

No processo do tratamento do esgoto as águas residuais são conduzidas para dentro das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), onde é retirado o material grosseiro e passam por um processo de biodegradação microbológica, em que bactérias e fungos degradam o material orgânico aproveitando-o em seu desenvolvimento (ALVARENGA *et al.*, 2017). Quando estes microrganismos morrem, eles passam a constituir a matéria orgânica do lodo. Após este processo, este material é separado em duas fases pela ação de decantação, gerando o efluente líquido e a parte sólida denominada biossólido ou lodo de esgoto (SANTOS, 2009).

O lodo de esgoto possui em sua composição matéria orgânica, proteínas, polissacarídeos, celulose, hemicelulose, lipídios, ácidos orgânicos, e espécies inorgânicas como íons metálicos e silicatos (COLLARD; TEYCHENÉ; LEMÉE, 2017). Pode ter uso industrial, como na produção de tijolos, cerâmica e cimento (LU; ZHOU; HE, 2019). Nas ETEs, o lodo pode ser destinado a incineração, disposição oceânica, aterros sanitários e no uso agrícola e florestal (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Na agricultura, o lodo de esgoto tem apresentado bons resultados como condicionador do solo e fertilizante, promovendo aumento na produtividade e economia nos custos com adubação, devido ao elevado nível de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo (ZUBA JUNIO *et al.*, 2013; NOGUEIRA *et al.*, 2013; PEREIRA; GARCIA, 2017). Entretanto, ele pode conter alguns contaminantes como metais pesados, organismos patogênicos e compostos orgânicos persistentes (CAMARGO *et al.*, 2018).

Uma alternativa para eliminação de contaminantes e organismos patogênicos é a remediação que visa a contenção, remoção ou redução da concentração de contaminantes (CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 2009). A remediação possui duas abordagens, a técnica *ex situ* que propõe remover e transportar o material contaminado a uma unidade de tratamento, e a técnica *in situ* que utiliza plantas e microrganismos no local, para recuperação do substrato contaminado (ASHRAF, *et al.*, 2019). As plantas usadas no processo de remediação devem possuir um sistema radicular profundo e denso, com alta taxa de crescimento e produção de biomassa e adaptabilidade ao material que será remediado (PROCÓPIO *et al.*, 2009).

O cultivo de gramíneas diretamente no lodo tem se mostrado uma boa alternativa para a estabilização deste material, apresentando boa adaptação, e crescimento de raízes, estimulando a decomposição e mineralização dos nutrientes, e melhorando a qualidade agrônômica para o seu uso como fertilizante orgânico (ALVARENGA *et al.*, 2017; CARDOSO, 2018).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo principal avaliar a qualidade agronômica do lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha* cv. Marandu na presença e ausência de microrganismos eficazes, superfosfato simples e KCl, para posterior uso como fertilizante orgânico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a qualidade agronômica do lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha* cv. Marandu na presença e ausência de microrganismos eficazes, superfosfato simples e KCl, para posterior uso como fertilizante orgânico.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a produção da braquiária cultivada em lodo de esgoto;
- Avaliar se a adição de microrganismos eficientes (EM), superfosfato simples (SS) e KCl potencializa o crescimento da braquiária e se influencia na decomposição da matéria orgânica no lodo de esgoto;
- Avaliar se há necessidade de compostagem do lodo de esgoto após o cultivo da braquiária, para fins de maior redução de contaminantes, e de incremento da qualidade do resíduo como fertilizante orgânico;
- Avaliar, após o período de cultivo da braquiária, as características de segurança e agronômicas do lodo de esgoto para fins de registro e de comercialização, segundo as normas dos Ministérios da Agricultura e do Meio Ambiente.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Lodo de esgoto

Em 2020 a população brasileira atingiu o número de 211,8 milhões de pessoas, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020). Com o aumento populacional, ocorre também o aumento da produção de lixo e resíduos sólidos, que por sua vez, contaminam o solo e a água, gerando enorme passivo ambiental (ABRELPE, 2011). Devido ao aumento da população e de seus resíduos, alternativas vêm sendo tomadas para destinação deste material, como, por exemplo, o tratamento de esgoto doméstico em estações de tratamento de esgotos (ETEs), gerando um resíduo rico em nutrientes denominado lodo de esgoto (QUINTANA, 2006; TUCCI, 2008).

Após os efluentes domésticos serem conduzidos para as ETEs, eles passam por um pré-tratamento para retirar o material grosseiro (VIDOR, 1999). Em seguida o material vai para reatores para o processo de biodegradação, que é a quebra de moléculas orgânicas feita por microrganismos como bactérias e fungos (TSUTIYA, 2000). Depois deste processo, o esgoto é separado por decantação em duas fases: líquida chamada de efluente líquido e sólida, denominada lodo de esgoto (SANTOS, 2011). O lodo de esgoto também é chamado de biossólido, este termo significa que o resíduo foi higienizado e foi criado para incentivar o uso dele como adubo e condicionador de solo (PIRES, 2005).

Nas ETEs, o lodo de esgoto é destinado a aterros sanitários, deposição oceânica e a incineração, elevando os custos operacionais, e dando destino inapropriado para este resíduo (HARRIS-PIERCE *et al.*, 1995). O lodo de esgoto possui alto teor de matéria orgânica e nutrientes como N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn, que podem ter destinação para a produção vegetal (BEZERRA *et al.*, 2006).

Desde que aplicado de forma controlada nas áreas agrícolas, o lodo de esgoto pode ser uma alternativa de destinação final sustentável, uma vez que o material é fonte de matéria orgânica e de nutrientes, podendo desempenhar importante papel no condicionamento do solo e no desenvolvimento das plantas. Além de proporcionar benefícios à sociedade e ao ambiente, pois contribui para a produção agrícola e para conservação do solo e da água (BITTENCOURT *et al.*, 2016).

Para utilização adequada do lodo é necessário que ele esteja dentro das normas da resolução CONAMA nº 498, onde são estabelecidos critérios e limites para aplicação do lodo e seus derivados na agricultura, além de classificar e estabelecer limites máximos permitidos de metais pesados, patógenos e compostos orgânicos tóxicos (BRASIL, 2020a). No caso de registro do lodo de esgoto como fertilizante, que exclui a necessidade de aplicação da resolução CONAMA mencionada, os limites são estabelecidos apenas para metais pesados e atributos agronômicos, e são regulados pelas Instruções Normativas do MAPA nº 07/2016 (BRASIL, 2016) e nº 61/2020 (BRASIL, 2020b).

3.2 Uso do lodo de esgoto na agricultura

A utilização do lodo de esgoto na agricultura além de promover melhorias no solo também proporciona economia nos custos com adubação (ALVARENGA, 2015). Malta (2001), realizando testes com o lodo de esgoto na agricultura, observou aumento na macroporosidade, microporosidade e na retenção de água no solo, além de melhorias químicas na fertilidade do solo e na produtividade.

Embora o lodo de esgoto tenha elevado potencial nutricional para agricultura, em culturas com maior exigência ao elemento K, é recomendado fazer a sua complementação (SILVA *et al.*, 2001). Isto ocorre em razão do K encontrar-se sob forma iônica nas águas residuárias, tendendo a ficar em solução

durante o tratamento nas estações de tratamento, ocasionando baixos teores do elemento em lodos de esgoto (TSUTIYA *et al.*, 2001). Vaz (2000), avaliando o crescimento inicial de eucalipto adubado com lodo de esgoto, observou que, além da adubação potássica, foi necessário realizar a fertilização fosfatada, atribuindo esse comportamento a dois possíveis fatores. Primeiro o P estava presente em formas não disponíveis ou lentamente disponíveis e, segundo a aplicação do biossólido foi superficial, nas entrelinhas, ficando distante das raízes, o que dificultou a absorção do nutriente. Simonete *et al.* (2003), estudando as propriedades químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo e a produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes em plantas de milho, também observaram que, após 30 dias de incubação do lodo no solo, houve necessidade de complementação do solo com K e P.

Ferreira (2008), testando doses de lodo de esgoto para adubação da cultura do açaí, obteve resultados positivos em sua utilização como condicionador do solo, não encontrando níveis significativos de contaminantes. Gonçalves *et al.* (2019) avaliaram a disponibilidade de metais pesados em plantas de milho cultivadas com diferentes doses de lodo de esgoto com e sem adição de fertilizantes minerais e observaram que o lodo proporcionou aumento da concentração de Cu e Zn no tecido foliar do milho, entretanto, os teores de Cu, Zn, Fe, Mn, Cd, Pb e Cr observados não atingiram os níveis considerados tóxicos.

3.3 Impacto do uso do lodo de esgoto na agricultura e processo de biorremediação

O lodo de esgoto pode conter níveis elevados de metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e organismos patogênicos, como coliformes fecais, salmonela, vírus e helmintos (PAREDES FILHO, 2011). Os contaminantes inorgânicos do lodo de esgoto, como metais pesados, podem ser originários de emissões veiculares, refinamento e incineração de resíduos urbanos e industriais, resíduos de fertilizantes e agroquímicos usados na agricultura e resíduos de mineração e fundição (TAVARES; CARVALHO, 1992). Devido à presença de contaminantes no lodo, a sua utilização se torna mais restrita, fazendo-se necessário o estudo contínuo de técnicas para eliminar estes contaminantes (TSUTIYA *et al.*, 2001).

Os procedimentos de descontaminação utilizados costumam ser onerosos, como a incineração, remoção do solo e utilização de produtos químicos (SHEORAN *et al.*, 2011; WUANA; OKIEMEN, 2011). Uma técnica para viabilização do lodo de esgoto é a biorremediação, que pode ser usada para descontaminação de substâncias orgânicas ou inorgânicas, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, agrotóxicos, subprodutos clorados e subprodutos tóxicos da indústria (CUNNINGHAM *et al.*, 1996).

Essa técnica propõe o uso de bactérias, fungos e plantas para degradar, remover e transformar estes contaminantes e compostos químicos de maneira ambiental e economicamente viável (COOKSON JR, 1995; TYAGI *et al.*, 2011). Os microrganismos são utilizados para intensificar a atividade decompositora, a fim de selecionar espécies que consigam degradar de maneira mais eficaz compostos de difícil degradação (BRANCO, 2002).

No caso da utilização de plantas para descontaminação de ambientes contaminados, a denominação é fitorremediação (BAUDDH; SINGH, 2012). Este processo é um método *in situ* com custos relativamente baixos (NASCIMENTO; XING, 2006). Uma das técnicas de fitorremediação é a fitoextração, habilidade das plantas de capturarem contaminantes com as suas raízes e translocar para a biomassa vegetal, (ITRC, 2009; PROCÓPIO *et al.*, 2009).

Algumas características desejáveis para as plantas usadas em fitorremediação são a rusticidade, a boa produção de biomassa, o crescimento rápido e a absorção de nutrientes (ZHANG *et al.*, 2010; ALI *et al.*, 2013; SIPOS *et al.*, 2013). A *Urochloa brizantha* é uma planta que apresenta boa adaptação ao clima tropical, bom crescimento e um sistema radicular que facilita a absorção de metais pesados, constituindo-se em uma espécie adequada para uso na fitorremediação de substratos contaminados (CAMARÃO; SOUZA FILHO, 2005; ALVARENGA, 2015).

3.4 Uso da *Urochloa brizantha* na descontaminação de substratos contaminados

As gramíneas do gênero *Urochloa* pertencem à família *Poaceae* e abrangem cerca de 100 espécies (FERNANDES, 2016). A *Urochloa brizantha* cv. Marandu, conhecida popularmente como brizantão, braquiário ou capim-marandu, é originária da África Tropical e África do Sul (CEZÁRIO *et al.*, 2015).

Dentre as plantas do gênero *Urochloa*, a *Urochloa brizantha*, é a que possui maior porte, podendo atingir 1,5 m de altura e também apresenta um sistema radicular muito desenvolvido, podendo chegar a 1,95 m de profundidade (OURIVES *et al.*, 2010; CAMARÃO; SOUZA FILHO, 2005). Essa gramínea apresenta rápido estabelecimento, boa produtividade, resistência às cigarrinhas típicas de pastagem e alta produção de sementes, além de apresentar boa adaptação as diferentes condições edafoclimáticas (VERZIGNASSI *et al.*, 2012; CRISPIM; BRANCO, 2002). De acordo com Cabral *et al.* (2018) a *Urochloa brizantha* demonstra boa adaptação às áreas tropicais, apresentando área de cultivo em milhões de hectares somente no Brasil.

O cultivo de *Urochloa* é muito utilizado no sistema de integração lavoura – pecuária, uma vez que promove a estruturação do solo e o deixa em melhores condições físicas para o crescimento da cultura subsequente, devido a qualidade do crescimento do seu sistema radicular (SALTON; TOMAZI, 2014; SANTOS *et al.*, 2015).

Vários são os relatos sobre o potencial fitorremediador da *Urochloa brizantha* cv. Marandu e da sua capacidade de crescimento em condições adversas. Merkl *et al.* (2005) estudaram o potencial fitorremediador de diversas espécies tropicais das savanas orientais da Venezuela, dentre elas a *Urochloa brizantha*, em solo contaminado com petróleo bruto a 5%, relatando que o solo cultivado com a *Urochloa brizantha* apresentou teor de petróleo significativamente menor do que o solo sem vegetação, ocorrendo correlação positiva entre produção de biomassa de raízes e degradação de petróleo, bem como a redução de compostos aromáticos. De modo semelhante, Braga *et al.* (2016), em estudo de fitorremediação de picloram por *Urochloa brizantha* cv. Marandu, constataram que esta gramínea é capaz de remediar solos contaminados com picloram, além de reduzir a lixiviação do herbicida.

Já Cardoso (2018), estudando o teor de HPAs em lodo de esgoto compostado, após cultivo com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha* cv. Marandu, constatou que as duas gramíneas contribuíram para a degradação dos HPAs. No entanto, a *Urochloa brizantha* cv. Marandu apresentou-se maior eficácia que o *Pennisetum purpureum* na degradação dos HPAs.

3.5 Referências

- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2011 .Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2011. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2011>>. Acesso em 20 jan. 2021.
- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A., Phytoremediation of heavy metals - Concepts and applications. **Chemosphere**, v. 91, n .7, p. 869-881, 2013.
- ALVARENGA, A. C.; BARBOSA, M. H. C.; CARDOSO, P. H. S.; PINHO, G. P.; SAMPAIO, R. A.; SOUSA, I. P. Phytoremediation of chlorobenzenes in sewage sludge cultivated with *Pennisetum purpureum* at different times. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 573–578, 2017.
- ALVARENGA, A. C. **Fitorremediação de metais pesados e clorobenzenos em lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum***. 2015. 97p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2015.
- ASHRAF, S.; ALI, Q.; ZAHIR, Z.A.; ASHRAF, S.; ASGHAR, H.N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 174, p. 714-727, 2019.
- BAUDDH, K.; SINGH, R. P. Growth, tolerance efficiency and phytoremediation potential of *Ricinus communis* (L.) and *Brassica juncea* (L.) in salinity and drought affected cadmium contaminated soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, p.13-22, 2012.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A., A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A., **Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura. 1. Ed.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 25-36.
- BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M.; AZEVEDO, J. C. R. Sorção de poluentes orgânicos emergentes em lodo de esgoto. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.21, n.1, p.43-53, 2016.
- BEZERRA, F. B.; OLIVEIRA, M. A.C.L.; PEREZ, D.V.; ANDRADE, A. G.; MENEGUELLI, N. A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 41, n. 3, p. 469-476, 2006.
- BRAGA, R. R.; SANTOS, J. B.; ZANUNCIO, J. C.; BIBIANO, C. S.; FERREIRA, E. A.; OLIVEIRA, M. C.; SILVA, D. V.; SERRÃO, J. E. Effect of growing *Brachiria brizantha* on phytoremediation of picloram under different pH environments. **Ecological Engineering**, v.94, p.102-106, 2016.
- BRANCO, S. M. Manual de esgotos: Origem, Tratamento, Biorremediação. **Consórcio Bio ativo/Bio ambiental. Goiânia**, 2002. 89p.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2014. Brasília: **SNIS**, 2016. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Acesso em 19 jan. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema Integrado de Legislação - Normativa nº 7. MAPA. Instrução Normativa SDA/MAPA 07/2016. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21513067/do1-2016-05-02-instrucao-normativa-n-7-de-12-de-abril-de-2016--21512974>. Acesso em 25 jan. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 161, p.265, 19 ago 2020a. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>>. Acesso em 25 jan. 2021.

BRASIL. Instrução Normativa nº 61, SDA/MAPA 07/2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. DOU, 15/07/2020, Seção 1. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>>. Acesso em 25 jan. 2021.

CABRAL, G. B.; CARNEIRO, V. T. C.; GOMES, A. C. M. M.; LACERDA, A. L.; MARTINELLI, A. P.; DUSI, D. M. A. Genetic transformation of *Urochloa brizantha* cv. Marandu by biolistics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.90, n.2, p. 1789-1797, 2018.

CAMARÃO, A. P.; SOUZA FILHO, A. P. S. Limitações e potencialidades do capim-braquiário (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu (A. Rich) Stapf.) para a Amazônia. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos** 211, 2005. 52p.

CAMARGO, F. P.; DO PRADO, P. F.; TONELLO, P. S.; DOS SANTOS, A. C. A.; DUARTE, I. C. S. Bioleaching of toxic metals from sewage sludge by co-inoculation of *Acidithiobacillus* and the biosurfactant-producing yeast *Meyerozyma guilliermondii*. **Journal of Environmental Management**, v. 211, p. 28-35, 2018.

CARDOSO, P. H. S. **Produção de adubo orgânico a partir do lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na presença e ausência de aeração e compostado**. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2018.

CEZÁRIO, A. S.; RIBEIRO, K. G.; SANTOS, S. A.; VALADARES FILHO, S. C.; PEREIRA, O. G. Silages of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu harvested at two regrowth ages: Microbial inoculant responses in silage fermentation, ruminant digestion and beef cattle performance. **Animal Feed Science and Technology**, v.208, p.33-43, 2015.

COLLARD, M.; TEYCHENÉ, B.; LEMÉE, L. Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: Solar, thermal and reed beds – Impact on organic matter characteristics. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 760–767, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº. 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf>>. Acesso em: 06 Abril. 2021.

COOKSON Jr, J. T. **Bioremediation engineering** - Design and application. McGraw-Hill Inc. EUA, 1995. 524p.

CRISPIM, S. M. A.; BRANCO, O.D. Aspectos Gerais das Braquiárias e suas Características na Sub-Região da Nhecolândia, Pantanal, MS. **Embrapa Pantanal-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2002. 27p.

CUNNINGHAM, Scott D. ; OW, David W. Promises and prospects of fitorremediação. **Fisiologia vegetal** , v. 110, n. 3, pág. 715, 1996.

FERNANDES, G. A. **Valor nutritivo do pasto de *Brachiaria brizantha* cv Marandu em diferentes épocas do ano**. 2016. 38p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.

FERREIRA, R.C. **Uso do lodo de esgoto no desenvolvimento do açai (*Euterpe oleracea Mart.*)**. 2008. 59 f: il. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco. 2008.

GONÇALVES, A. A., MOREIRA, C. R., DE PAULA SOUZA, G. B., PERES, D. M., & CANZI, G. M. Adubação com lodo de esgoto na cultura do milho. **Revista Técnico-Científica**, n. 17, p. 1-13, 2019.

HARRIS-PIERCE, R.L.; REDENTE, E.F.; BARBARICK, K.A. Sewage sludge application effects on runoff water quality in a semiarid grassland. **Jornal of Environmental Quality**, n.24, p.112-115, 1995.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2020, IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html?utm_source=portal&utm_medium=popclock&utm_campaign=novo_popclock>. Acesso em: 10 julho de 2020.

ITRC – Interstate Technology and Regulatory Council. **Evaluating LNAPL Remediation Technologies for Achieving Project Goals**. LNAPL Team. 2009.

LU, J. X.; ZHOU, Y.; HE, P.; WANG, S.; SHEN, P.; POON, C. S. Sustainable reuse of waste glass and incinerated sewage sludge ash in insulating building products: Functional and durability assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117635, 2019.

MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: estudo do caso do município de Rio das Ostras**. 2001. Dissertação (Mestrado) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2001.

MERKL, N.; SCHULTZE-KRAFT, R.; INFANTE. Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of petroleum-contaminated soils. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.165. p.195-209, 2005.

NASCIMENTO, C. W. A.; XING, B., Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and plant accumulation. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 3, p. 299-311, 2006.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.168–177, 2013.

ONU. UNITED NATIONS ORGANIZATION. Nova York, 2013. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-atingir-96-bilhoes-em-2050-diz-novo-relatorio-da-onu/>>. Acesso em: 06 Abril. 2021.

OURIVES, O. E. A.; SOUZA, G. M.; TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H. Fertilizante orgânico como fonte de fósforo no cultivo inicial de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.126-132, 2010.

PAREDES FILHO, M.V. Compostagem de lodo de esgoto para uso agrícola. **Revista Agroambiental**, v.3, n.3, p.73-80, 2011.

PEREIRA, A. C. A.; GARCIA, M. L. Efeitos da disposição de lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústria alimentícia no solo: Estudo de caso. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 531–538, 2017

PIRES, A.M.M. **Lodo de esgoto**. AMBIENTEBRASIL. EMBRAPA Meio Ambiente, 2005.p.1-2

PROCÓPIO, S. O.; CARMO, M. L.; PIRES, F. R. *et al.* Efeito da densidade populacional de *Panicum maximum* (cultivar Tanzânia) na fitorremediação de solo contaminado com o herbicida picloram. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, p. 295-304, 2009.

QUINTANA, N. R. G. **Análise econômica da aplicação de bio sólido na agricultura**. 2006.Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2006.

SALTON, J.C.; TOMAZI, M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. **Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2014.

SANTOS, E. R. **Caracterização química, microbiológica e toxicidade do lodo de esgoto da Estação Mangueira, Pernambuco, Brasil**. 2011. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

SANTOS, F.L.S.; MELO, W.R.F.; COELHO, P.H.M.; BENETT, C.G.S.; DOTTO, M.C. Crescimento inicial de espécies de *Urochloa* em função da profundidade de semeadura. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 2: 1-6. 2015.

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

- 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**, v.38, n.10, p.1187-1195, 2003.
- SIPOS, G.; SOLTI, A.; CZECH, V.; VASHEGYI, L.; TÓTH, B.; CSEH, E.; FODOR, F., Accumulation of heavy metals and tolerance of energy grass (*Elymuselongatus* subsp. *Ponticus* cv. Szarvasi-1) grown in hydroponic culture. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 68, p. 96-103, 2013.
- SHEORAN, V.; SHEORAN, A.; POONIA, P., Papel de hiperacumuladoras em fitoextração de metais de minas contaminadas: uma revisão. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, n. 41, p. 168-214, 2011.
- TAVARES, T. M.; CARVALHO, F. M. Avaliação da exposição de populações humanas a metais pesados no ambiente: exemplos do Recôncavo Bahiano. **Química Nova**, v.15, p.147-153, 1992.
- TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. Vol. 22, nº 63, São Paulo: 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>>. Acesso em: 06 de jun.
- TSUTYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. **Impacto Ambiental do Uso Agrícola de Lodo de Esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, p.69-105, 2000.
- TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM, P. S.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. 468p.
- TYAGI, M.; FONSECA, M.M.R.; CARVALHO, C.C.C.R. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. **Biodegradation**, v.22, n. 2, p. 231-241, 2011.
- VAZ, L. M. S. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. 2000. 41 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo, 2000.
- VERZIGNASSI, J. R.; POLTRONIERI, L. S.; BENCHIMOL, R. L.; FRANÇA, S. K. S.; CARVALHO, E. A.; FERNANDES, C. D. *Pyricularia grisea*: novo patógeno em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu no Pará. **Summa Phytopathol**, v.38, n.3, p.254, 2012.
- VIDOR, C. Descarte de lodo de estações de tratamento de efluentes domésticos no solo. In: TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. (Ed.) **Manejo racional de resíduos no solo**. Porto Alegre: DS/UFRGS, p. 128-150, 1999.
- WUANA, R. A.; OKIEIMEN, F. E., Metais pesados em solos contaminados: uma revisão de fontes, química, riscos e melhores estratégias disponíveis para a remediação. **Ecologia**, p. 1-20, 2011.
- ZHANG, X.; XIA, H.; LI, Z.; ZHUANG, P.; GAO, B. O. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils. **Bioresource Technology**, China, v. 101, n. 6, p. 2063-2066, 2010.

ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; CARNEIRO, J. P.; 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**, v.17, n.7, p. 706-712, 2013.

4. ARTIGO - QUALIDADE AGRONÔMICA DO LODO DE ESGOTO CULTIVADO COM *Urochloa brizantha* cv. Marandu NA PRESENÇA DE ACELERADOR DE COMPOSTAGEM, SUPERFOSFATO SIMPLES E KCl

Este artigo foi elaborado conforme as normas da Revista Engenharia Agrícola.

RESUMO

O lodo de esgoto é um resíduo proveniente das estações de tratamentos de esgotos com enorme potencial para uso como fertilizante orgânico. Todavia, necessita de processo de estabilização, para fins de eliminar o odor e a atração de vetores de moléstias e organismos nocivos. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha* cv. Marandu na presença e ausência de acelerador de compostagem (AC), superfosfato simples (SS) e KCl, para posterior uso como fertilizante orgânico. O experimento foi conduzido no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, distribuídos em esquema fatorial 2^3 , correspondendo a presença e ausência de acelerador de compostagem (0 e 30,7 L t⁻¹), duas doses de superfosfato simples (SS) (0 e 6 kg t⁻¹ de P₂O₅) e duas doses de KCl (0 e 3,6 kg t⁻¹ de K₂O). Foram utilizados sacos de aniagem de 30 litros para o acondicionamento do lodo de esgoto, estabelecendo-se uma camada de 30 cm de altura e semeada com 100 sementes de *U. brizhanta* por m², mantendo-se, após o desbaste, 18 plantas por m², com período de cultivo de 90 dias. Nas análises de matéria seca da parte aérea (PA), raiz (RZ), matéria seca total (MT) e relação PA/RZ os melhores resultados foram aqueles que tiveram aplicação de P₂O₅ e K₂O. Avaliando os teores de C orgânico e N, ambos atenderam as exigências da legislação para fins de registro do produto como fertilizante orgânico. Observando os valores de relação C/N e pH-H₂O, em função das aplicações do AC e das doses de SS e KCl, a relação C/N aumentou com a aplicação de adubo fosfatado. O pH do lodo de esgoto aumentou com a aplicação de adubo potássico. Tanto a CTC quanto a relação CTC/C não foram influenciados pelos tratamentos. Pelo exposto, verificou-se que as adubações com SS ou KCl favoreceram a produção de biomassa da gramínea e que o AC praticamente não teve eficácia sobre essa variável e sobre os atributos do lodo de esgoto. De todo modo, o lodo de esgoto cultivado com a gramínea apresentou atributos agrônômicos dentro dos limites exigidos para registro como fertilizante pela legislação específica, apresentando-se como um fertilizante orgânico de qualidade para uso no cultivo de plantas.

Palavras-chave: Biossólido; Fertilizante orgânico; Reciclagem de resíduos.

ABSTRACT

Sewage sludge is a waste from sewage treatment plants with enormous potential for use as an organic fertilizer. However, it needs a stabilization process, in order to eliminate the odor and attract disease vectors and harmful organisms. Given the above, the objective of this work was to evaluate the sewage sludge cultivated with *Urochloa brizantha* cv. Marandu in the presence and absence of composting accelerator (CA), simple superphosphate (SS) and KCl, for later use as an organic fertilizer. The experiment was carried out in a randomized block design, with four replications, distributed in a 2^3 factorial scheme, corresponding to the presence and absence of composting accelerator (0 and 30.7 L t⁻¹), two doses of simple superphosphate (SS) (0 and 6 kg t⁻¹ of P₂O₅) and two doses of KCl (0 and 3.6 kg t⁻¹ of K₂O). Lineage bags of 30 liters were used for the packaging of sewage sludge, establishing a layer of 30 cm in height and sown with 100 seeds of *U. brizantha* per m², maintaining after thinning 18 plants per m², with 90-day growing period. In the analysis of shoot dry matter (PA), root (RZ), total dry matter (MT) and PA/RZ ratio, the best results were those that had applied P₂O₅ and K₂O. Assessing the levels of organic C and N, both met the requirements of the legislation for the purpose of registering the product as an organic fertilizer. Observing the values of C/N and pH-H₂O, as a function of CA applications and doses of SS and KCl, the C/N ratio increased with the application of phosphate fertilizer. The pH of sewage sludge increased with the application of potassium fertilizer. Both CTC and CTC/C ratio were not influenced by the treatments. From the above, it was found that fertilization with SS or KCl favored the production of grass biomass and that CA was practically ineffective on this variable and also on the attributes of sewage sludge. In any case, the sewage sludge cultivated with the grass presented agronomic attributes within the limits required for registration as a fertilizer by specific legislation, presenting itself as a quality organic fertilizer for use in plant cultivation.

Keywords: Biosolid; Organic fertilizer; Waste recycling.

4.1 Introdução

O tratamento do esgoto urbano e industrial produz um resíduo sólido denominado lodo de esgoto (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006), o qual pode ser destinado a queima industrial, disposição oceânica ou para aterros sanitários, sendo estas alternativas onerosas e não sustentáveis (HE *et al.*, 2014). Embora seja uma prática que requer ainda maiores estudos em condições tropicais, há evidências concretas do potencial do lodo de esgoto para uso como fertilizante agrícola, dada a sua composição com elevado nível de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, o que pode reduzir os custos com adubação e elevar a produção de espécies cultivadas (ZUBA JUNIO *et al.*, 2013; NOGUEIRA *et al.*, 2013).

Todavia, o lodo pode conter níveis elevados de metais pesados, substâncias orgânicas tóxicas e organismos patogênicos, como bactérias, vírus e ovos de helmintos, sendo necessário o desenvolvimento de técnicas para a descontaminação deste material. No caso de patógenos, o processo de desidratação em temperaturas elevadas ou mesmo o processo de compostagem ou de tratamento com substância alcalina, têm apresentado ótimos resultados na eliminação da carga de microrganismos. Por outro lado, as altas concentrações de substâncias orgânicas tóxicas e de metais pesados requerem ainda o desenvolvimento de técnicas mais eficazes, de forma que os níveis fiquem sempre dentro de limites seguros (SUCHKOVA *et al.*, 2014; ALVARENGA *et al.*, 2017; CAMARGO *et al.*, 2018).

A remediação é uma ação de recuperação que visa a remoção, contenção ou redução de contaminantes, sendo dividida em duas técnicas, a *in situ* que acontece no local e a *ex situ* que necessita da remoção do material da área contaminada para outro local (CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 2009). A técnica *in situ* costuma apresentar custo de 60 a 80% menor que a técnica *ex situ*, podendo utilizar de microrganismos para acelerar a decomposição e quebra de moléculas mais difíceis de serem decompostas e plantas para acumular e transportar elementos químicos em seus tecidos (SUBHASHINI; SWAMY, 2016; ASHRAF, *et al.*, 2019). Alguns trabalhos têm demonstrado que espécies como o *Pennisetum purpureum* e a *Urochloa brizantha*

promovem a fitorremediação de lodo de esgoto, apresentando boa adaptação e desenvolvimento radicular, bem como, eficácia na redução das concentrações de substâncias tóxicas (ALVARENGA *et al.*, 2017; CARDOSO, 2018).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade agronômica do lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha* cv. Marandu na presença e ausência de acelerador de compostagem, superfosfato simples e KCl, para posterior uso como fertilizante orgânico.

4.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido no período de 16 de setembro a 16 de dezembro de 2019 na fazenda experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro do Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As coordenadas geográficas em graus decimais do local da pesquisa é -16.682893 e -43.840358, com altitude de 652 m. Conforme a classificação de Köppen, o clima predominante na região é o Aw – tropical de savana, com verão chuvoso e inverno seco.

As parcelas foram constituídas de sacos de polipropileno de 30 litros, onde foram preenchidas com o lodo de esgoto até a altura de 30 cm, e espaçamento de 1 metro entre os sacos.

Figura 1-Vista dos sacos preenchidos com o lodo (esquerda). Vista dos sacos com o espaçamento de 1 metro (direita).



Fonte: Do autor, 2019.

O lodo de esgoto utilizado no experimento foi obtido na Estação de Tratamento de Esgotos de Montes Claros, operada pela COPASA. Na referida estação há quatro reatores onde é feito o

tratamento biológico anaeróbio, com cada um deles apresentando capacidade para processar 125 litros por segundo. Na etapa final do tratamento de esgoto ocorre o processo de decantação do lodo, com a água tratada sendo lançada a um curso d'água. O lodo de esgoto passa pelos processos de centrifugação e tratamento térmico a 350°C, por um período de 30 minutos, sendo que o secador térmico de lodo utiliza energia gerada pelo biogás, formado nos reatores anaeróbios. A produção diária é de, aproximadamente, 10 m³ por dia de lodo de esgoto, com 8% de umidade.

O experimento foi distribuído no esquema fatorial 2 x 2 x 2, no delineamento em blocos casualizados, com 4 repetições. Os fatores em estudo foram a presença e ausência de aplicação de acelerador de compostagem (AC), combinados com duas doses de superfosfato simples (0 e 6 kg t⁻¹) e duas doses de KCl (0 e 3,6 kg t⁻¹), aplicados no lodo de esgoto para cultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu, totalizando oito tratamentos e 32 unidades experimentais.

Para inoculação do lodo com AC foi utilizado o produto comercial Embriotic®, o qual foi ativado por meio da diluição do inóculo concentrado (10%) em água (80%) e melaço de cana (10%). A mistura foi homogeneizada e guardada em recipiente em ambiente protegido por 7 dias. Após este período foram aplicados 20 L da solução ativada por m³ de lodo de esgoto (NORD, 2013).

Figura 2- Inoculação do lodo com o acelerador de compostagem.



Fonte: Do autor, 2019.

O semeio da gramínea *Urochloa brizantha* cv Marandu foi feito utilizando-se 100 sementes por m², a 1 cm de profundidade e apresentando a densidade de 18 plantas por m² após o desbaste.

Figura 3- Início da germinação das sementes de *Urochloa*.



Fonte: Do autor, 2019.

Durante o cultivo, as parcelas foram irrigadas de forma a manter a umidade próxima a capacidade de campo, repondo-se a água sempre que a umidade do substrato atingiu a tensão de - 1 atm, com o intuito de manter água disponível para a cultura e para a atividade biológica, porém, evitando-se o encharcamento e, consequentemente, perdas por escoamento de “chorume”.

Após o período de 90 dias, foram coletadas amostras da parte aérea da planta, da raiz e do lodo esgoto de todas as unidades experimentais para análise, a fim de estimar a produção de matéria seca da planta.

Figura 4- Coleta das amostras.



Fonte: Do autor, 2019.

As amostras do lodo foram armazenadas em frascos de vidro e acondicionadas em geladeira a 4 °C até o momento das análises. Já as amostras das plantas coletadas, passaram por uma primeira limpeza com água de torneira e em seguida foram lavadas com água destilada. As mesmas foram condicionadas em sacos de papel para secagem em estufa de circulação forçada de ar até peso constante, a 65°C. Em seguida foram armazenadas em sacos plásticos até o momento da pesagem.

Nas amostras de lodo coletadas foram realizadas as análises de umidade, pH em H₂O, C orgânico, N total e mineral, condutividade elétrica e capacidade de troca catiônica (CTC), utilizando-se as metodologias de Tedesco *et al.* (1995). Para a determinação dos teores de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Pb, Cr, Cd e Ni, utilizou-se o processo da digestão com solução nítrico-perclórica 3:1 em bloco digestor. A quantificação do P foi feita por espectrofotômetro UV/VIS, enquanto do K foi determinado por fotômetro de chama. Os demais elementos foram analisados em um espectrofotômetro de absorção atômica AA240FS (Varian, Brasil), que determina concentrações em mg L⁻¹, não sendo detectados os elementos Cr, Cd e Ni (MALAVOLTA, 2006; ABREU *et al.*, 2007; ALCARDE, 2009). No material vegetal foram determinadas as massas da matéria fresca e seca da raiz e da parte aérea.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Os resultados finais foram comparados aos valores estabelecidos na Resolução CONAMA nº 498 (BRASIL, 2020a) e Instruções Normativas de números 61 e 7 do Ministério da Agricultura do Brasil (BRASIL, 2016; BRASIL, 2020b).

4.3 Resultados

A matéria seca da parte aérea da *U. brizantha* (PA) apresentou interação apenas dos fatores acelerador de compostagem (AC) e P₂O₅ com o fator K₂O (TABELA 1). O menor valor para a PA ocorreu na ausência de aplicação de fósforo e potássio e os maiores valores ocorreram com a

aplicação de 6 kg t⁻¹ de P₂O₅ ou de 3,6 kg t⁻¹ de K₂O. Constatou-se também que a incorporação de fósforo ao lodo de esgoto promoveu aumento da produção da parte aérea, independente da aplicação de AC e de potássio. Da mesma forma que o fósforo, a aplicação de potássio foi a mesma na ausência ou presença de AC.

Tabela 1– Produção de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha* (PA), da raiz (RZ) e total (MT), e relação PA/RZ, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P₂O₅) e cloreto de potássio (K₂O)

Efeitos da superfertilização com fósforo (P ₂ O ₅) e potássio (K ₂ O)								
PA (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)
		0	6		0	3,6		
	0	74,88	86,19	80,54 A	77,50 Ab	83,56 Aa	-	
	30,7	73,83	83,10	78,47 A	69,14 Bb	87,79 Aa	-	
	Média	74,36 b	84,65 a	-	-	-	-	
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média				
		0	3,6					
0	59,76 Bb	88,95 Aa						
6	86,88 Aa	82,40 Ba						
RZ (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)
		0	6		0	3,6		
	0	39,88	41,90	40,89 A	35,43 Aa	46,35 Ab	-	
	30,7	35,17	43,01	39,09 A	39,83 Aa	38,36 Ba	-	
	Média	37,53 a	42,46 a	-	-	-	-	
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média				
		0	3,6					
0	30,65 Bb	44,61 Aa						
6	44,61 Aa	40,30 Aa						
MT (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)
		0	6		0	3,6		
	0	114,76	128,09	121,43 A	112,93	129,92	121,43 A	
	30,7	109,01	126,11	117,56 A	108,97	126,14	117,56 A	
	Média	111,89 b	127,10 a	-	110,95 b	128,03 a	-	
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média				
		0	3,6					
0	90,41 Bb	133,35 Aa						
6	131,49 Aa	122,70 Bb						
PA/RZ (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)
		0	6		0	3,6		
	0	1,95	2,12	2,04 A	2,18 Aa	1,89 Ba	-	
	30,7	2,10	2,03	2,07 A	1,80 Aa	2,33 Ab	-	
	Média	2,03 a	2,08 a	-	-	-	-	
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média				
		0	3,6					
0	1,96	2,09	2,03 A					
6	2,02	2,14	2,08 A					
Média	1,99 a	2,12 a	-					

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Em relação a matéria seca da raiz da *U. brizantha* (RZ), também houve interação apenas dos fatores AC e P₂O₅ com o fator K₂O (TABELA 1). A exemplo do observado para a PA, o menor

resultado ocorreu na ausência de aplicação de fósforo e potássio e os maiores resultados ocorreram com as aplicações de 6 kg t^{-1} de P_2O_5 ou de $3,6 \text{ kg t}^{-1}$ de K_2O .

Para a matéria seca total da *U. brizantha* (MT), houve interação apenas do fator P_2O_5 com o fator K_2O (TABELA 1). Constatou-se, portanto, que o AC não teve efeito sobre a MT e que a incorporação de fósforo ou de potássio ao lodo de esgoto promoveu aumento da MT. O menor resultado para a MT ocorreu na ausência de aplicação de fósforo e potássio e o maior resultado ocorreu com a aplicação de 6 kg t^{-1} de P_2O_5 ou de $3,6 \text{ kg t}^{-1}$ de K_2O .

No caso da relação PA/RZ, (TABELA 1), houve interação dos fatores AC e K_2O , sendo que a aplicação de $3,6 \text{ kg t}^{-1}$ juntamente de $30,7 \text{ L t}^{-1}$ do AC promoveu maior produção de matéria seca da parte aérea em relação a produção de raízes, enquanto, para o P_2O_5 , não houve efeito da dose aplicada.

Pelo exposto, ficou evidente que a aplicação do superfosfato simples juntamente com o cloreto de potássio, proporcionou menos matéria seca da gramínea do que com a aplicação individual desses fertilizantes. É possível que tal fato esteja relacionado ao aumento da competição iônica entre os cátions e ânions do adubo fosfatado com os do adubo potássico, afetando a absorção desses nutrientes pela planta.

Os teores de carbono orgânico do lodo de esgoto cultivado não foram influenciados pelos tratamentos (TABELA 2). Todavia, para todos os tratamentos, os valores ficaram abaixo do valor da caracterização inicial, com redução média da ordem de 19%, evidenciando o processo de decomposição da matéria orgânica desse resíduo. Em todo o caso, todos os tratamentos apresentaram teores muito acima de 80 g kg^{-1} , considerado o limite crítico exigido pela IN-MAPA nº 61/2020 para registro como adubo organomineral para fins de comercialização (BRASIL, 2020b).

Tabela 2– Teores totais de C orgânico, N, P e K no lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha*, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P₂O₅) e cloreto de potássio (K₂O)

Superfosfato simples (P ₂ O ₅) e cloreto de potássio (K ₂ O)										
C (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)	
		0	6		0	3,6				
		0	157,32	181,08	169,20 A	169,40	169,00	169,20 A		
		30,7	158,51	167,19	162,85 A	163,67	162,03	162,85 A		
		Média	157,92 a	174,14 a	-	166,54 a	165,52 a	-		
		P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						13,34	204,09
			0	3,6						
		0	157,57	158,26	157,92 A					
		6	175,50	172,77	174,14 A					
		Média	166,54 a	165,52 a	-					
N (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)	
		0	6		0	3,6				
		0	30,15	29,74	29,95 A	30,20	29,70	29,95 A		
		30,7	29,58	29,42	29,50 B	29,52	29,48	29,50 B		
		Média	29,87 a	29,58 a	-	29,86 a	29,59 a	-		
		P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						1,32	33,05
			0	3,6						
		0	29,95	29,78	29,87 A					
		6	29,77	29,39	29,58 A					
		Média	29,86 a	29,59 a	-					
P (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)	
		0	6		0	3,6				
		0	8,78 Bb	10,10 Ba	-	9,08 Bb	9,81 Ba	-		
		30,7	11,25 Aa	10,54 Ab	-	11,18 Aa	10,62 Ab	-		
		Média	-	-	-	-	-	-		
		P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						3,91	8,33
			0	3,6						
		0	9,94	10,09	10,02 B					
		6	10,31	10,34	10,32 A					
		Média	10,13 a	10,22 a	-					
K (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)	
		0	6		0	3,6				
		0	7,34	6,71	7,02 A	6,94	7,11	7,02 A		
		30,7	6,28	7,77	7,02 A	6,49	7,55	7,02 A		
		Média	6,81 a	7,24 a	-	6,72 a	7,33 a	-		
		P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						17,69	7,27
			0	3,6						
		0	6,51	7,11	6,81 A					
		6	6,92	7,55	7,24 A					
		Média	6,72 a	7,33 a	-					

TI = teor do elemento na caracterização inicial. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Em relação aos teores de nitrogênio no lodo de esgoto cultivado (TABELA 2), houve uma pequena redução desse nutriente apenas para a aplicação do acelerador de compostagem, o que pode significar um pouco mais de mineralização e de absorção pelas plantas. Todavia, houve um decréscimo médio de 10% do teor de N do lodo de esgoto cultivado em relação ao teor inicial desse resíduo. De todo o modo, todos os tratamentos apresentaram teores muito acima de 10 g kg⁻¹, considerado o limite crítico exigido pela IN-MAPA nº 61/2020 para registro como adubo organomineral para fins de comercialização (BRASIL, 2020b).

Os teores de fósforo no lodo de esgoto cultivado foram mais elevados nos tratamentos com adição de superfosfato simples ou com acelerador de compostagem (TABELA 2). Observou-se também que houve um acréscimo de 22% do teor médio de fósforo em relação aos valores obtidos na caracterização inicial do lodo. Tal fato resulta do aumento da mineralização deste nutriente no lodo de esgoto com o uso do acelerador de compostagem e da aplicação do adubo fosfatado. Os teores de fósforo observados no lodo de esgoto, até mesmo nos tratamentos sem incorporação de adubos minerais, atenderam plenamente ao valor mínimo exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, que é de $4,4 \text{ g kg}^{-1}$ de P no fertilizante (10 g kg^{-1} de P_2O_5), para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização (BRASIL, 2020b).

Os teores de potássio no lodo de esgoto cultivado não foram influenciados pelos tratamentos (TABELA 2). Entretanto, para o lodo cultivado, houve um decréscimo de 3% em relação a caracterização inicial do lodo. Os teores desse elemento observados no lodo de esgoto em todos os tratamentos não atenderam ao valor mínimo exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, que é de $8,3 \text{ g kg}^{-1}$ de K (10 g kg^{-1} de K_2O), para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização como fonte desse elemento (BRASIL, 2020b).

Os teores de cálcio no lodo de esgoto cultivado não foram influenciados pelos tratamentos (TABELA 3). Todavia, os valores dos tratamentos ficaram abaixo do valor da caracterização inicial, com redução média da ordem de 15%. Os teores desse elemento no lodo de esgoto em todos os tratamentos suplantaram em muito o valor mínimo exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, que é de 10 g kg^{-1} de Ca, para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização como fonte desse elemento (BRASIL, 2020b).

Tabela 3– Teores totais de Ca, Mg e S no lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha*, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P_2O_5) e cloreto de potássio (K_2O)

		P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)					
AC (L t ⁻¹)		0	6		0	3,6								
Ca (g kg ⁻¹)	0	61,68	67,14	64,41 A	61,69	67,12	64,41 A	10,13	78,16					
	30,7	66,77	69,67	68,22 A	67,78	68,65	68,22 A							
	Média	64,22 a	68,40 a	-	64,74 a	67,89 a	-							
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		64,22 A										
		0	3,6											
	0	63,12	65,33											
	6	66,35	70,45											
	Média	64,74 a	67,89 a	-										
Mg (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)					
		0	6		0	3,6								
	0	5,50	6,08	5,59 A	5,13 Bb	6,45 Aa	-	15,16	4,31					
	30,7	5,76	6,30	6,03 A	6,16 Aa	5,90 Aa	-							
	Média	5,63 a	6,19 a	-	-	-	-							
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		5,63 A										
		0	3,6											
0	5,23	6,03												
6	6,05	5,83												
	Média	5,64 a	5,93 a	-										
S (g kg ⁻¹)	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)					
		0	6		0	3,6								
	0	0,25	0,33	0,29 A	0,29	0,30	0,29 A	26,97	0,22					
	30,7	0,26	0,23	0,25 A	0,27	0,22	0,25 A							
	Média	0,26 a	0,28 a	-	0,28 a	0,26 a	-							
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)		0,26 A										
		0	3,6											
0	0,29	0,22												
6	0,27	0,30												
	Média	0,28 a	0,26 a	-										

TI = teor do elemento na caracterização inicial. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os teores de magnésio no lodo de esgoto cultivado (TABELA 3) foram mais elevados nos tratamentos com aplicação de KCl e acelerador de compostagem. Além disso, houve acréscimo médio de 34% desse elemento no lodo cultivado em comparação com o lodo da caracterização inicial. Contudo, os teores de magnésio no lodo de esgoto em todos os tratamentos não atenderam ao valor mínimo exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, que é de 10 g kg⁻¹ de Mg, para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização como fonte desse elemento (BRASIL, 2020b).

Os teores de enxofre no lodo de esgoto cultivado não foram influenciados pelos tratamentos (TABELA 3). Entretanto, houve um acréscimo de 23% do teor médio desse elemento em relação a caracterização do lodo inicial. Contudo, os teores de enxofre no lodo de esgoto em todos os tratamentos não atenderam ao valor mínimo exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, que é de 10 g kg⁻¹

¹ de S, para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização como fonte desse elemento (BRASIL, 2020b).

Os teores de cobre do lodo de esgoto cultivado apresentaram incremento em seus valores com a adição de acelerador de compostagem na ausência da aplicação de KCl (TABELA 4). Tal fato pode ser atribuído a uma maior decomposição desse resíduo, principalmente com a adição do acelerador de compostagem, sendo o aumento médio do teor de Cu de 7% em relação ao valor obtido na caracterização inicial. De todo modo, os teores de desse elemento no lodo de esgoto atenderam ao valor mínimo exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, que é de 200 mg kg⁻¹ de Cu, para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização como fonte desse elemento (BRASIL, 2020b).

Tabela 4 – Teores totais (mg kg⁻¹) de Cu, Zn e Pb no lodo de esgoto cultivado com *Urochloa brizantha*, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P₂O₅) e cloreto de potássio (K₂O).

	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (mg kg ⁻¹)
		0	6		0	3,6			
Cu	0	197,44	199,38	198,41 A	196,31 Aa	200,50 Aa	-		
	30,7	197,79	201,67	199,73 A	202,31 Ba	197,15 Aa	-		
	Média	197,62 a	200,53 a	-	-	-	-		
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						2,55	186,67
		0	3,6						
	0	197,48	197,75	197,62 A					
Zn	6	201,15	199,90	200,53 A					
	Média	199,32 a	198,83 a	-					
	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (mg kg ⁻¹)
		0	6		0	3,6			
	0	639,58	687,15	663,37 A	646,35	680,38	663,37 A		
	30,7	539,06	549,48	544,27 A	547,40	541,15	544,27 A		
Pb	Média	589,32 a	618,32 a	-	596,88 a	610,77 a	-		
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						18,61	326,04
		0	3,6						
	0	581,25	597,40	589,32 A					
	6	612,50	624,13	618,32 A					
	Média	596,88 a	610,77 a	-					
Pb	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (mg kg ⁻¹)
		0	6		0	3,6			
	0	78,33	76,04	77,19 A	77,29	77,08	77,19 A		
	30,7	75,83	76,67	76,25 A	75,83	76,67	76,25 A		
	Média	77,08 a	76,36 a	-	76,56 a	76,88 a	-		
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)						4,90	66,25
Pb		0	3,6						
	0	77,29	76,88	77,08 A					
	6	75,83	76,88	76,36 A					
	Média	76,56 a	76,88 a	-					

TI = teor do elemento na caracterização inicial. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Os teores de zinco no lodo de esgoto cultivado não foram influenciados pelos tratamentos (TABELA 4). Entretanto, o teor médio do lodo de esgoto cultivado aumentou em 85% o valor da caracterização inicial. Tal fato evidencia o processo de mineralização ocorrido com o lodo de esgoto após o cultivo com a gramínea. Entretanto, os teores deste elemento ficaram abaixo do limite mínimo de 1.000 mg kg^{-1} , exigido para registro desse resíduo como fertilizante organomineral pela IN-MAPA nº 61/2020 (BRASIL, 2020b).

Os teores de chumbo no lodo de esgoto cultivado não foram influenciados pelos tratamentos (TABELA 4). Entretanto, apresentou aumento médio de 16%, comparado ao valor da caracterização inicial do lodo de esgoto. Neste caso também, ficou evidente o efeito da decomposição do lodo de esgoto aumentando a concentração desse elemento. De todo modo, os teores desse elemento estão abaixo do limite máximo de 10 mg kg^{-1} , estabelecido pela IN SDA - MAPA nº 27/2006 (BRASIL, 2006), alterada pela IN DAS - MAPA nº 7/2016 (BRASIL, 2016).

A relação C/N do lodo de esgoto cultivado aumentou em comparação aos outros tratamentos, com a aplicação do adubo fosfatado (TABELA 5). Para os demais tratamentos não houve efeito sobre essa variável. A redução da relação C/N em comparação ao valor da caracterização inicial do lodo de esgoto foi de 10%. De todo o modo, ficou evidente que houve um aumento de decomposição do lodo de esgoto para todos os tratamentos, sendo que os valores ficaram abaixo do limite máximo de 20, estabelecido pela IN-MAPA nº 61/2020, para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização (BRASIL, 2020b).

Tabela 5 – Valores de relação C/N, pH-H₂O, CTC, relação CTC/C e condutividade elétrica (CE) no lodo de esgoto cultivado, em função das aplicações do acelerador de compostagem (AC) e das doses de superfosfato simples (P₂O₅) e cloreto de potássio (K₂O)

	AC (L t ⁻¹)	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)		Média	K ₂ O (kg t ⁻¹)		Média	CV (%)	TI (g kg ⁻¹)	
		0	6		0	3,6				
C/N	0	5,22	6,09	5,66 A	5,62	5,69	5,66 A	13,57	6,18	
	30,7	5,36	5,69	5,53 A	5,55	5,50	5,53 A			
	Média	5,29 b	5,89 a	-	5,59 a	5,60 a	-			
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)								
	0	5,27	5,31	5,29 B						
	6	5,90	5,88	5,89 A						
	Média	5,59 a	5,60 a	-						
pH	0	6,40	6,44	6,42 A	6,37 Ab	6,46 Aa	-	0,79	6,24	
	30,7	6,41	6,39	6,40 A	6,40 Aa	6,39 Ba	-			
	Média	6,41 a	6,42 a	-	-	-	-			
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)								
	0	6,39	6,42	6,41 A						
	6	6,39	6,44	6,42 A						
	Média	6,39 b	6,43 a	-						
CTC (mmol _c kg ⁻¹)	0	521,08	573,90	547,49 A	535,16	559,83	547,49 A	11,95	684,19	
	30,7	512,02	538,67	525,35 A	508,49	542,20	525,35 A			
	Média	516,55 a	556,29 a	-	521,82 a	551,01 a	-			
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)								
	0	493,53	539,58	516,55 A						
	6	550,12	562,45	556,29 A						
	Média	521,82 a	551,01 a	-						
CTC/C	0	33,15	31,92	32,54 A	31,84	33,23	32,54 A	5,94	33,52	
	30,7	32,42	32,20	32,31 A	31,06	33,56	32,31 A			
	Média	32,79 a	32,06 a	-	31,45 b	33,40 a	-			
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)								
	0	31,39	34,18	32,79 A						
	6	31,51	32,62	32,06 A						
	Média	31,45 b	33,40 a	-						
CE (dS m ⁻¹)	0	1,71	1,81	1,76 A	1,69	1,83	1,76 A	10,35	3,50	
	30,7	1,61	1,59	1,60 B	1,54	1,66	1,60 B			
	Média	1,66 a	1,70 a	-	1,61 b	1,75 a	-			
	P ₂ O ₅ (kg t ⁻¹)	K ₂ O (kg t ⁻¹)								
	0	1,60	1,72	1,66 A						
	6	1,62	1,77	1,70 A						
	Média	1,61 b	1,75 a	-						

TI = teor do elemento na caracterização inicial. Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O pH sofreu uma pequena redução com a adição da adubação potássica, enquanto os demais tratamentos não tiveram efeito sobre essa variável (TABELA 5). Também, houve um acréscimo no valor de pH em relação ao valor inicial no lodo de esgoto, que foi de 3%, o que evidencia o aumento da decomposição do lodo de esgoto com o cultivo da gramínea.

A CTC e a relação CTC/C não foram influenciadas pelos tratamentos (TABELA 5). Todavia, houve decréscimos de 22% para a média da CTC do lodo de esgoto na fase de cultivo, enquanto, para a relação CTC/C, o decréscimo foi de 3%, quando em comparação com os valores iniciais da caracterização do lodo de esgoto. A redução dessas variáveis pode ser explicada pela renovação da matéria orgânica do solo, promovida pelas raízes da gramínea cultivada no lodo de esgoto. De todo o modo, os valores de CTC são muito superiores ao valor mínimo de 80 mmolc kg⁻¹ exigido pela IN-MAPA nº 61/2020, para fins de registro do fertilizante organomineral para comercialização.

A condutividade elétrica (CE) do lodo de esgoto foi mais elevada nos tratamentos sem adição de acelerador de compostagem e com adição de KCl (TABELA 5). Todavia, houve um decréscimo em relação ao valor da caracterização, que foi em média de 52%. Tal fato revela que a aplicação de KCl tem um leve efeito no incremento dos sais no lodo, mas que no final do cultivo, houve uma razoável perda de sais desse resíduo, seja pela absorção pelas plantas ou por perdas por lixiviação. Considerando que um substrato é considerado salino somente com condutividade elétrica da solução do solo a partir 4 dS m⁻¹, considera-se que não há nenhuma limitação de uso desse fertilizante na agricultura (RUIZ *et al.*, 2006).

4.4 Discussão

4.4.1 Influência do lodo de esgoto com e sem aditivos (AC, P₂O₅ e K₂O) no crescimento de *Urochloa brizantha*.

A *Urochloa brizantha* foi escolhida para o plantio no lodo de esgoto em razão do seu rápido crescimento, boa adaptação e desenvolvimento em diversos tipos de ambientes, bem como, por possuir tolerância a teores elevados de metais pesados e ter capacidade fitorremediadora de lodo de esgoto (CAMARÃO; SOUZA FILHO, 2005; BOSSU *et al.*, 2011; CARDOSO, 2018).

A adição de potássio no lodo de esgoto é importante pelo fato desse resíduo ter baixa concentração desse nutriente, o qual é bastante solúvel e tende a permanecer em sua maior parte na água tratada nas Estações de Tratamento de Esgotos, devolvida depois aos corpos d'água (PAGLIA *et al.*, 2007). Deste modo, a aplicação do potássio no lodo de esgoto para o cultivo de *U. brizantha* se faz necessária e benéfica, como foi comprovado por meio dos resultados encontrados, onde a fertilização com esse elemento apresentou efeitos favoráveis para todas as variáveis de crescimento avaliadas (matéria seca da PA, RZ e MT, e relação PA/RZ). O acréscimo do potássio apresentou efeito positivo porque é um nutriente requerido em grandes quantidades pela *U. brizantha*, participando como ativador enzimático em processos bioquímicos como a fotossíntese, respiração e translocação, processos esses fundamentais no crescimento e desenvolvimento vegetal (TAIZ; ZEIGER, 2016).

Todavia, mesmo apresentando resultados satisfatórios em relação ao crescimento da gramínea, a aplicação de potássio no lodo de esgoto ainda foi insuficiente, pois os teores de K ficaram cerca de 15% abaixo do valor mínimo exigido para a comercialização como organomineral (BRASIL, 2020b). Com isso, recomenda-se a aplicação de doses maiores de potássio no lodo de esgoto, tanto para atender ao cultivo de *U. brizantha* quanto para elevar as concentrações para fins de comercialização como fertilizante organomineral.

Não obstante o efeito favorável da adubação fosfatada, a qual isoladamente proporcionou aumento da produção de matéria seca da planta, o caso da interação negativa entre a aplicação de potássio e de fósforo, reduzindo levemente a produção de matéria seca, pode ser atribuído ao uso do superfosfato simples, o qual contém de 18 a 20% de Ca, e que pode ter exercido efeito de competição com o K pela absorção pela planta. É possível que a aplicação de uma dose menor do superfosfato simples ou a aplicação de uma fonte mais concentrada de fósforo possa ter uma interação mais positiva em relação a adubação potássica.

A matéria vegetal cultivada no lodo de esgoto pode ser utilizada para diversos fins, como o uso da parte aérea na alimentação animal, bem como, material combustível para geração de

energia, além do sequestro de carbono e redução da emissão de gases do efeito estufa (SILVA *et al.*, 2008; MATOS, 2017). Também, pode ser usada como material carbonáceo na compostagem do próprio lodo de esgoto, proporcionando incremento de nutrientes à matéria orgânica e resolvendo o problema de obtenção de material carbonáceo das estações de tratamento que fazem a reciclagem do lodo de esgoto (CARDOSO, 2018).

4.4.2 Influência do cultivo de *Urochloa brizantha* no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P_2O_5 e K_2O), em relação aos teores totais de macronutrientes primários.

Os teores de carbono no lodo de esgoto diminuíram com o cultivo de *Urochloa brizanta*, em relação ao teor inicial, possivelmente por influência das raízes da gramínea, aumentando a diversidade biológica e a intensidade de decomposição desse resíduo (CARDOSO, 2018). Contudo, a biomassa da parte aérea e das raízes crescidas no lodo de esgoto foram separadas desse resíduo no final, o que significa que, com a sua incorporação, poderia ter aumentado em muito os teores de carbono no lodo de esgoto. De qualquer forma, houve intensa decomposição da matéria orgânica, o que provocou a redução do teor médio de C orgânico ao final, mas que ainda assim ficou acima do valor de 80 g kg^{-1} , que é o mínimo exigido para fins de registro do fertilizante orgânico para comercialização (BRASIL, 2020b).

A adição do acelerador de compostagem no lodo de esgoto promoveu redução do teor de nitrogênio nesse resíduo, possivelmente em razão do aumento da taxa de decomposição e da absorção desse elemento pelas plantas, ou até mesmo, algumas perdas por lixiviação e volatilização. De todo modo, os teores de nitrogênio ficaram muito acima do valor mínimo (10 g kg^{-1}) exigido para fins de registro do fertilizante orgânico para comercialização (BRASIL, 2020b).

No caso do fósforo, o aumento dos teores no lodo de esgoto foi proveniente da adição do superfosfato simples e da decomposição da matéria orgânica do lodo, intensificada pela adição do

acelerador de compostagem, o que proporcionou maior disponibilidade no substrato e, consequentemente, maior absorção pelas plantas (HAROUN *et al.*, 2009). Os teores deste elemento também atingiram o valor mínimo ($4,4 \text{ g kg}^{-1}$) exigido para fins de registro do fertilizante orgânico para comercialização (BRASIL, 2020b).

No caso da adição de potássio no lodo de esgoto, embora a dose aplicada tenha promovido aumento na produção de matéria seca da gramínea, os teores finais no resíduo foram baixos e não variaram entre os tratamentos, não atingindo o valor mínimo para registro como fertilizante ($8,3 \text{ g kg}^{-1}$) (BRASIL, 2020b). Neste caso, convém incrementar ainda mais a dose de K aplicada no lodo de esgoto, tendo-se o cuidado de escolher uma fonte contendo enxofre e parcelar a aplicação, de forma a minimizar as perdas por lixiviação.

4.4.3 Influência do cultivo de *Urochloa brizantha* no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P_2O_5 e K_2O), em relação aos teores totais de macronutrientes secundários.

Após o cultivo da gramínea, houve diminuição dos teores médios de cálcio no lodo de esgoto em relação ao teor inicial, sendo tal fato atribuído a absorção pela planta e perdas por lixiviação. De todo modo, os teores de cálcio no lodo de esgoto foram muito altos, superando o limite de 10 g kg^{-1} para registro como fertilizante orgânico (BRASIL, 2020b), porém, extrapolando em muito o limite de 29 g kg^{-1} recomendado para adubos orgânicos (KIEHL; PORTA, 1981).

Estes teores elevados de cálcio no lodo de esgoto original podem ser atribuídos ao fato do município estar situado em área cárstica, tornando os níveis de cálcio elevados na água e, por conseguinte, no lodo de esgoto (SOUSA, 2013). A elevação também se justifica pela adição do superfosfato simples, que possui cerca de 20% de cálcio, em alguns tratamentos. Convém destacar que a presença de teores elevados de cálcio no substrato pode promover a competição com outros elementos, como o K e Mg, gerando menor absorção dos mesmos (MALAVOLTA, 2006).

Os teores de magnésio no lodo de esgoto cultivado com a gramínea aumentaram em relação ao teor inicial e foram classificados como médio, ficando bem abaixo do limite máximo de 12 g kg⁻¹ recomendado para adubos orgânicos por Kiehl e Porta (1981) e para o registro como fertilizante organomineral (BRASIL, 2020b). Muito embora, a adição de acelerador de compostagem tenha incrementado um pouco o teor de cálcio no lodo de esgoto, faz-se necessário um complemento na adubação mineral para atingir os níveis mínimos para registro como fertilizante orgânico (BRASIL, 2020b).

No caso do enxofre, o incremento observado no lodo de esgoto cultivado com a gramínea pode ter sido atribuído a mineralização do resíduo e a adição do superfosfato simples, o qual possui em sua composição em torno de 12% de enxofre. No entanto, os teores desse elemento ficaram abaixo do valor mínimo para registro como fertilizante orgânico (BRASIL, 2020b), sendo necessário complemento na adubação mineral, de preferência com sulfato duplo de potássio e magnésio. Os níveis mais baixos de enxofre podem estar relacionados a absorção pelas plantas ao longo do cultivo, perdas por lixiviação e redução, e consumo por bactérias no processo da decomposição (GERARDI, 2006).

4.4.4 Influência do cultivo de *Urochloa brizantha* no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P₂O₅ e K₂O), em relação aos teores totais de metais pesados.

O aumento dos teores de cobre no lodo de esgoto cultivado com a *U. brizantha*, em relação ao teor inicial, pode ser atribuído ao aumento da mineralização desse resíduo. Isto ocorre dada a elevada afinidade do cobre com a matéria orgânica humificada, face a sua carga positiva e geometria dos íons (AMERY *et al.*, 2010), evitando maiores perdas por lixiviação e até mesmo regulando a absorção pelas plantas. Contudo, os teores de cobre no lodo de esgoto não atingiram o valor mínimo de 200 mg kg⁻¹ exigido para registro do fertilizante orgânico para comercialização

(BRASIL, 2020b). Neste caso, a adição de sulfato de cobre pode ser uma boa alternativa para a elevação dos níveis desse elemento no lodo de esgoto compostado.

Para o zinco, os teores desse elemento praticamente dobraram após o cultivo, em relação ao teor inicial, ocorrendo também um processo de interação iônica com a matéria orgânica humificada, evitando perdas desse elemento por lixiviação, bem como, regulando a absorção pelas plantas. De todo modo, os teores deste elemento ficaram abaixo do limite mínimo de 1.000 mg kg^{-1} exigido para o registro do fertilizante orgânico para comercialização (BRASIL, 2020b). Neste caso também, a adição de sulfato de zinco pode ser uma boa alternativa para a elevação dos níveis desse elemento no lodo de esgoto compostado.

No caso do lodo de esgoto estabilizado ser utilizado na agricultura apenas com base nas exigências da Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020a), ou seja, sem o registro como fertilizante orgânico ou organomineral, os teores totais de cobre e zinco bem abaixo de 1.500 e 2.800 mg kg^{-1} , respectivamente, que são os valores máximos permitidos, enquadrando-o como de Classe 1.

Os teores de chumbo do lodo de esgoto cultivado aumentaram em relação ao teor inicial, o que pode ser resultado do aumento da decomposição desse resíduo, em razão da redução da perda de carbono e liberação de água (HAROUN *et al.*, 2009). Todavia, os teores ficaram abaixo do valor máximo permitido pela IN-MAPA nº 07/2016 (BRASIL, 2016) para registro do fertilizante orgânico para comercialização, que é de 150 g kg^{-1} , e abaixo do valor máximo de 300 g kg^{-1} , o qual o enquadra como de Classe 1, para uso como fertilizantes orgânico com base na Resolução CONAMA nº 498 (BRASIL, 2020a). Além dos baixos teores de chumbo no lodo, convém destacar que, na presença de matéria orgânica humificada e pH entre 6 e 8, o chumbo forma bastantes compostos insolúveis, dificultando a absorção pelas plantas e aumentando ainda mais a segurança do uso desse resíduo na agricultura (KABATA-PENDIAS, 2001, CARDOSO, 2018).

4.4.5 Influência do cultivo de *Urochloa brizantha* no lodo de esgoto, com ou sem aditivos (AC, P_2O_5 e K_2O), em relação aos atributos químicos.

A relação C/N do lodo de esgoto cultivado diminuiu em relação ao valor inicial, o que indica que houve aumento da decomposição desse resíduo. O maior valor de relação C/N observado com a aplicação do adubo fosfatado indica menor grau de decomposição do lodo cultivado neste tratamento, possivelmente em razão de algum desequilíbrio na relação de nutrientes para os microrganismos. De todo modo, De Oliveira Boina *et al.* (2018), em um estudo com inoculação de microrganismos biorremediadores em composto de lodo de esgoto, concluíram que para obter um maior aproveitamento do resíduo é necessário a utilização de microrganismos mais compatíveis ao lodo de esgoto.

Convém destacar que a relação C/N é indicadora do grau de decomposição da matéria orgânica, sendo que, quanto mais intensa for a decomposição, menor o valor dessa relação (BEZERRA *et al.*, 2006). No caso da IN-MAPA nº 61/2020, o valor máximo permitido para fins de registro do fertilizante orgânico para comercialização é 20 (BRASIL, 2020b). Neste caso, o lodo de esgoto atende plenamente a esse pré-requisito exigido pela legislação.

Quanto ao pH do lodo de esgoto cultivado, houve aumento dos valores em relação ao valor inicial, principalmente com a adubação potássica. Tal fato ocorreu pela adição de uma base importante, como o potássio, e pelo aumento da mineralização do lodo de esgoto. A média de pH observada neste estudo se enquadra nos critérios estabelecidos pela IN-MAPA nº 61/2020 (BRASIL, 2020b), que estabelece para registro como fertilizante orgânico para comercialização, o valor mínimo de pH- H_2O de no mínimo 6,0.

A CTC total e a relação CTC/C do lodo de esgoto cultivado diminuíram em relação aos valores iniciais, o que pode ser atribuído ao aumento da decomposição desse resíduo e a perda de carbono e de algumas substâncias húmicas mais solúveis. Por outro lado, os decréscimos

verificados nestas variáveis indicam também que o crescimento das raízes na fase de cultivo adicionou matéria orgânica fresca ao lodo de esgoto.

A exemplo do pH, tanto a CTC quanto a relação CTC/C não têm limites impostos pela IN-MAPA nº 61/2020 (BRASIL, 2020b), para fins de registro do fertilizante orgânico para comercialização, devendo apenas serem mencionados no rótulo. Entretanto, considera-se adequado um valor de CTC/C de no máximo 30. Neste caso, o lodo de esgoto estaria ligeiramente acima desse valor.

A condutividade elétrica do lodo de esgoto cultivado diminuiu em relação ao valor inicial, principalmente com a aplicação do acelerador de compostagem, possivelmente pelo maior incremento da mineralização da matéria orgânica e absorção dos elementos pelas plantas, bem como pelas perdas por lixiviação. Por outro lado, a adição de KCl incrementou a condutividade elétrica, o que se deve ao elevado índice salino desse fertilizante e que contribui para o aumento da pressão osmótica da solução (KLUTHCOUSKI; STONE, 2003).

Convém ressaltar que para o cultivo de *U. brizantha* no lodo de esgoto, todos os valores de da condutividade elétrica ficaram muito elevados (CARDOSO, 2018). Assim, ajustando-se os valores para a CE do extrato de saturação (TEDESCO *et al.*, 1995), o valor médio de $1,67 \text{ dS m}^{-1}$ obtido seria 12 vezes maior, ou seja, de aproximadamente 20 dS m^{-1} . Segundo Zhang e Sun (2016) o limite máximo de condutividade elétrica recomendado para que as plantas de interesse econômico não tenham a sua produtividade reduzida é de 4 dS m^{-1} , o que implica que este lodo de esgoto não está adequado para uso como substrato puro no cultivo de plantas. Contudo, com a incorporação no solo, mesmo com dose que chegue a 5% da massa de solo seco, os sais vão ficar bastante diluídos e não vão afetar as plantas.

4.5 Conclusões

A *Urochloa brizantha* apresenta bom desempenho para cultivo no lodo de esgoto e a sua biomassa pode ser utilizada como matéria prima para compostagem, na queima para geração de energia e até mesmo ser ofertada para alimentação animal.

A adição do acelerador de compostagem não apresenta efeitos importantes sobre a produção de matéria seca da *Urochloa brizantha* e atributos químicos do lodo de esgoto.

A aplicação das doses de 6 kg t^{-1} de P_2O_5 , na forma de superfosfato simples, ou de $3,6 \text{ kg t}^{-1}$ de K_2O , na forma de KCl, proporcionam as maiores produções de matéria seca da *Urochloa brizantha*, porém, com pouca influência sobre os atributos químicos do lodo de esgoto.

O lodo de esgoto após o cultivo atende aos critérios exigidos pela IN-MAPA nº 61/2020, para fins de registro como fertilizante orgânico. Contudo, para atender aos critérios de fertilizante organomineral demonstra a necessidade de complemento com uma dose maior de K e, no caso de fonte de elementos específicos, com Mg, S, Cu e Zn.

Os teores de Chumbo, Cádmio, Cromo e Níquel enquadram-se dentro dos níveis aceitáveis desses elementos no lodo de esgoto para uso agrícola, conforme estabelecido na Resolução Conama nº 498/2020.

4.6 Referências

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G., XI - Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 645-736, 2007.
- ALCARDE, J. C. **Manual de Análise de Fertilizantes**. Piracicaba: FEALQ. 2009. 259p.
- ALVARENGA, A. C.; BARBOSA, M. H. C.; CARDOSO, P.H.S.; PINHO, G. P.; SAMPAIO, R.A., SOUSA, I. P. Phytoremediation of chlorobenzenes in sewage sludge cultivated with *Pennisetum purpureum* at different times. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 573–578, 2017.
- AMERY, Fien *et al.* A cinética de dissociação de complexos de matéria orgânica dissolvidos em Cu de solo e corretivos de solo. **Analytica chimica acta**, v. 670, n. 1-2, pág. 24-32, 2010.
- ASHRAF, S.; ALI, Q.; ZAHIR, Z.A.; ASHRAF, S.; ASGHAR, H.N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 174, p. 714-727, 2019.
- BEZERRA, F. B.; OLIVEIRA, M. A. C. L.; PEREZ, D. V.; ANDRADE, A. G.; MENEGUELLI, N. A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 41, p. 469-476, 2006.
- BOSSU, C. M.; BERNARDI, A. C. C.; AMARAL, C. D.; SOUZA, G. B.; NOGUEIRA, A. R. A. Produção de *Brachiaria brizantha* cultivada em solo contaminado com As, Cd, Cr E Pb. In: **Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas-anais. Uberlândia: SBCS, 2011., 2011.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 27, 05 de Junho de 2006. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-27-de-05-06-2006-alterada-pela-in-sda-07-de-12-4-16-republicada-em-2-5-16.pdf/view>>. Acesso em 20/01/2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Sistema Integrado de Legislação - Normativa nº 7. MAPA. Instrução Normativa SDA/MAPA 07/2016. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21513067/do1-2016-05-02-instrucao-normativa-n-7-de-12-de-abril-de-2016--21512974>. Acesso em 25/01/2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 498. Define critsaltonérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 161, p.265, 19 ago 2020a. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>>. Acesso em 25/01/2021.

BRASIL. Instrução Normativa nº 61, SDA/MAPA 07/2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. DOU, 15/07/2020, Seção 1. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>>. Acesso em 25/01/2021.

CAMARÃO, A. P.; SOUZA FILHO, A. P. S. Limitações e potencialidades do capim-braquiarião (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu (A. Rich) Stapf.) para a Amazônia. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos** 211, 2005. 52p.

CAMARGO, F. P.; DO PRADO, P. F.; TONELLO, P. S.; DOS SANTOS, A. C. A.; DUARTE, I. C. S. Bioleaching of toxic metals from sewage sludge by co-inoculation of *Acidithiobacillus* and the biosurfactant-producing yeast *Meyerozyma guilliermondii*. **Journal of Environmental Management**, v. 211, p. 28-35, 2018.

CARDOSO, P. H. S. **Produção de adubo orgânico a partir do lodo de esgoto cultivado com *Pennisetum purpureum* e *Urochloa brizantha*, na presença e ausência de aeração e compostado**. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2018.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº. 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf>>. Acesso em: 06 Abril. 2021.

DE OLIVEIRA BOINA, W. L.; CORDEIRO, J. S.; BOINA, R. F. Efeito da inoculação de biorremediador no procedimento de compostagem de lodo de esgoto. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 5, p. 106-116, 2018.

GERARDI, M. H. Wastewater Bactéria. **Wasterwater Microbiology Ser.** Wiley & sons, Incorporated, John. p. 272. 2006.

HAROUN, M.; IDRIS, A.; OMAR, S. Analysis metal during composting of the tannery sludge using physicochemical and spectroscopic techniques. **Journal of Hazardous Materials**, v.165, n. 1-3, p.111-119, 2009.

HE, C.; CHEN, C. L.; GIANNIS, A.; YANG, Y.; WANG, J. Y., Hydrothermal gasification of sewage Sludge and model compounds for renewable hydrogen production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 1127-1142, 2014.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soil and plants**. Boca Raton. CRC Press, p. 315, 2001.

KIEHL, E.J.; PORTA, A. Métodos de amostragem de lixo e composto e interpretação dos resultados analíticos. **Revista Limpeza Pública**, n.19, p.3-7, 1981.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Efeitos nocivos do manejo inadequado da adubação no crescimento radicular das culturas anuais, com ênfase no potássio. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2003, 19 p. (Documentos 158). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAP/21630/1/doc_158.pdf. Acesso em 19/02/2021.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MATOS, A. L. A. Biossólido utilizado na nutrição de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. 2017.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.168–177, 2013.

NORD, E. Qualidade química na compostagem de resíduos sólidos com inoculação biológica. **Revista de Estudos Sociais** – Ano 2013 n. 30, V. 15, p. 149. 2013.

PAGLIA, E. C.; SERRAT, B. M.; FREIRE, C. A. 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**, v. 11, p. 94-100, 2007.

RUIZ, H. A.; SAMPAIO, R. A.; FERREIRA, P. A. Características físicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação. **Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal**, v.6, n.3, p.1-12, 2006.

SILVA, A. C. A.; FRANCISCO, A. C.; SCANDELARI, L. A cogeração de energia a partir do capim *brachiaria*: um caso de inovação na indústria de bioenergia. **XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.**

SOUSA, J.C.L. Recursos hídricos: Breves considerações sobre o sistema de abastecimento de água no município de Montes Claros/MG e a percepção dos cidadãos em relação ao uso da água. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.3, p.102-119, 2013.

SUBHASHINI, V.; SWAMY, A.V.V.S. Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Soils by *Catharanthus roseus*. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, v. 5, n. 12, p. 726–729, 2016.

SUCHKOVA, N.; TSIRIPIDIS, I.; ALIFRAGKIS, D.; GANOULIS, J.; DARAKAS, E.; SAWIDIS, TH., Assessment of phytoremediation potential of native plants during the reclamation of an area affected by sewage sludge. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 160-169, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

VAN HAANDEL, A.; ALEM SOBRINHO, P. **Produção, composição e constituição de lodo de esgoto**. In ANDREOLLI, C. (coord.), Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 417p. 2006.

ZHANG, L.; SUN, X. Influence Of bulking agentes on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. **Waste Management**, v.48, p. 115-126, 2016.

ZUBA JUNIO, G. R.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; CARNEIRO, J. P.; 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**, v.17, p.706-712, 2013.

5 Considerações finais

O lodo de esgoto possui contaminantes que limitam o seu uso na agricultura, como metais pesados, organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos, que podem causar danos ao meio ambiente. Este trabalho utilizou o processo da biorremediação para livrar o lodo dos seus contaminantes, microrganismos eficientes para influenciar a decomposição da matéria orgânica junto a adição de adubos químicos para agregar a composição do lodo e auxiliar no desenvolvimento da *Urochloa brizantha*. A biorremediação no lodo de esgoto, junto a microrganismos eficientes e a adição de P_2O_5 e K_2O , demonstraram potencialidade na produção de material vegetal da *Urochloa brizantha*. O bom desenvolvimento da *Urochloa brizantha* no lodo de esgoto apresenta diversas alternativas para sua utilização possibilitando a geração de renda em alguns setores como a geração de energia. O próximo passo desta pesquisa será a realização da compostagem deste material adicionando a *Urochloa brizantha* ao lodo que passou pelo processo do cultivo. A técnica do cultivo diretamente no lodo se torna uma alternativa para solucionar o problema da geração de resíduo das ETEs, proporcionando a biorremediação do lodo e suprimindo a necessidade da aquisição de material vegetal em centros de reciclagem de lodo de esgoto, eliminando os contaminantes e oferecendo material vegetal para a produção de compostagem reduzindo os custos e otimizando a produção deste adubo. Atendendo aos critérios exigidos pela IN-MAPA nº61/2020 e a Resolução Conama nº498/2020, o lodo de esgoto após os procedimentos realizados nesta pesquisa pode ser classificado como fertilizante orgânico sendo possível a sua utilização na agricultura.