

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GISELY DE SÁ RIBAS

CARACTERIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO DRAGADO DE LAGOAS DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES EM JOINVILLE/SC E ALTERNATIVAS DE
DISPOSIÇÃO FINAL

Itajaí

Outubro de 2020

GISELY DE SÁ RIBAS

CARACTERIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO DRAGADO DE LAGOAS DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES EM JOINVILLE/SC E ALTERNATIVAS DE
DISPOSIÇÃO FINAL

Dissertação apresentada ao
Mestrado Profissional em
Clima e Ambiente do
Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
diploma de Mestre em Clima
e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Thiago
Pereira Alves

Co-orientadora: Profa. Dra.
Débora Monteiro Brentano

Itajaí

Outubro de 2020

Pxy Ribas, Gisely de Sá.

Ficha catalográfica para trabalhos acadêmicos / Gisely de Sá Ribas. -
Florianópolis, 2020.

xxxp

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Santa Catarina,
Câmpus Florianópolis, Curso de Mestrado em Clima e Ambiente,
Florianópolis, 2020.

Orientador: Thiago Pereira Alves

1. Metodologia. 2. Métodos de estudo. 3. Pesquisa. 4. Trabalhos
científicos. I. Gisely de Sá Ribas. II. Título

CDD 001.4

Catalogado por: (Nome do Bibliotecário e Registro no CRB)

Aluno (a): **GISELY DE SA RIBAS**

Título:	CARACTERIZACAO DE LODO DE ESGOTO DRAGADO DE LAGOAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM JOINVILLE/SC E ALTERNATIVAS DE DISPOSICAO FINAL
----------------	--

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora em
cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente**

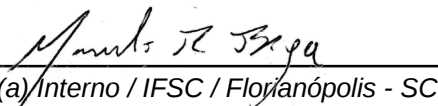
Dr(a). **THIAGO PEREIRA ALVES**



Orientador(a) / Presidente / IFSC / Itajaí – SC

Participação: () Presencial (X) Videoconferência
() Aprovado () Reprovado

Dr(a). **MARCELO RENNO BRAGA**



Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC

Participação: () Presencial (X) Videoconferência
(X) Aprovado () Reprovado

Dr(a). **WALTER MARTIN WIDMER**



Avaliador(a) Interno / IFSC / Florianópolis - SC

Participação: () Presencial (X) Videoconferência
(X) Aprovado () Reprovado

MSc. **JÚLIO CESARLEÃO**



Avaliador(a) Externo / UNIVALI / Itajaí - SC

Participação: () Presencial (X) Videoconferência
(X) Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(X) unanimidade

Este trabalho é dedicado à força universal que nos ilumina e nos concede parte
ínfima de sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a energia e inteligência universal, por me proporcionar capacidade de evoluir e crescer intelectual e moralmente nesse plano.

Sou grata à vida e seu poder de guiar-se na direção de um Propósito. Sou grata por toda minha história e trajetória, por isso, reconheço minha dedicação, força, comprometimento e abdições ao longo da formação. Apenas nós sabemos as dores e as delícias de ser quem somos.

Aos meus professores desse programa de mestrado, por me orientarem em direção aos melhores caminhos. Em especial ao Professor Orientador Dr. Thiago Pereira Alves e a Professora Co-orientadora Dra. Débora Monteiro Brentano, por todo apoio de conteúdo, auxílio metodológico, ajuda técnica e que não pouparam esforços na execução deste projeto.

Agradecimento aos que contribuíram para o desenvolvimento deste estudo Fabio Bertacin por todo apoio de conteúdo e auxílio; a empresa Allonda Ambiental e a Águas de Joinville pela disponibilização do case e possibilidade de desenvolvimento do projeto de pesquisa; a Professora Patrícia Fóes Scherer Custódio por todo auxílio metodológico; a Servidora Federal Thatiana de Oliveira Pinto Bióloga e Técnica do Laboratório do IFSC por todo auxílio em práticas de laboratório.

Aos amigos feito nesse mestrado, companheiros de idas e vindas, risadas e calor no coração; que com certeza serão levados para uma vida afora: Cristiane Rosa, Evandro Mafra e João Gaya.

RESUMO

A dragagem é uma técnica amplamente utilizada em diversas atividades que necessitam remobilizar sedimentos das mais diferentes origens. Os principais impactos ambientais da operação são com relação à disposição final dos sedimentos. Estes necessitam disposição final ambientalmente adequada para evitar que, sem tratamento, gerem contaminações. O estudo sobre a disposição dos sedimentos dragados de lagoas anaeróbias (lodo de esgoto) tem importância estratégica quanto ao reaproveitamento desta classe de resíduos sólidos. O lodo de esgoto constitui um grave problema ambiental atual devido à grande produção, fruto das atividades antrópicas, além de poder, concentrar substâncias como metais pesados e organismos patogênicos, possui macro e micronutrientes com potencial de fertilização. A metodologia da pesquisa baseia-se na caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto desaguado em unidades “*geobags*” proveniente de quatro lagoas anaeróbias da estação de tratamento de esgoto. A caracterização do lodo de esgoto demonstrou que todas as variáveis se apresentaram nos parâmetros preconizados pela legislação vigente, classificando-o como Classe A. Isto demonstra a possibilitando de disposição e reaproveitamento deste material, de forma ambientalmente adequada. O biossólido apresentou grande potencial de uso como insumo agrícola, respeitando as características das culturas. Neste sentido, como benefício, haverá redução da emissão de gases promotores de efeito estufa no sentido de transporte, disposição e decomposição da matéria orgânica, com incremento de aumento na produtividade das plantas, potencializando o resgate de Carbono atmosférico.

Palavras-Chave: “*geobags*”. Sedimento. Biossólido.

ABSTRACT

Dredging is a technique widely used in many activities that requires to remobilize sediments from the most different origins. The main environmental impacts of the operation are related to the final disposal of sediments. All dredge sediment need to be analyzed and classified correctly to receive a property treatment before the final deposit to avoid contamination. The study on the elimination of dredged sediments from anaerobic lagoons (sewage sludge) is strategically important for the reuse of this class of dredged sediments. Sewage sludge is a serious current environmental problem due to the large production, result of human activities, besides being able to concentrate substances such as heavy metals and pathogenic organisms, it has macro and micronutrients with potential for fertilization. The methodology is based on the physical-chemical and microbiological characterization of sewage sludge dewatered in geobags from four anaerobic lagoons at the sewage treatment plant. The characterization of sewage sludge showed that all variables were within the parameters recommended by current legislation, classifying it as Class A. This demonstrates the possibility of disposing and reusing this material, in an environmentally appropriate manner. Biosolids showed great potential for use as an agricultural input, respecting the characteristics of crops. Based on all results collected in this study, as a benefit, there will be a reduction in the emission of greenhouse gases in the sense of transportation, disposal and decomposition of organic matter, with an increase in the productivity of plants, increasing the recovery of atmospheric carbon.

Keywords: "*geobags*". Sediment. Biosolid

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	28
1.1. Embasamento legal do uso do sedimento da dragagem	31
1.2. Potencial de emissões atmosféricas	36
1.3. Justificativa.....	37
1.3.3 Objetivos	38
2. METODOLOGIA.....	39
2.1 Procedência do lodo	39
2.2 Coleta do material.....	41
2.3 Caracterização do lodo de esgoto.....	42
2.3.1. Análise de Metais	42
2.3.2. Ensaio de germinação e desenvolvimento de radícula de sementes	43
2.3.3 Sólidos totais, fixos e voláteis	44
2.4. Análise da adequação do lodo de esgoto para uso agrícola.....	45
2.5. Análises estatísticas	46
3 RESULTADOS	46
3.1. Análises de metais.....	46
3.2. Parâmetros microbiológicos	48
3.3. Ensaio de germinação	48
3.4. Sólidos totais, fixos e voláteis	51
3.5. Potencial agronômico	53
4 DISCUSSÃO	55
4.1. Caracterização do lodo de esgoto.....	55
4.2. Parâmetros microbiológicos	59
4.3. Ensaio de germinação	60
4.4. Sólidos totais, fixos e voláteis	62
4.5. Potencial agronômico	62

4.6.	Redução de cargas microbiológica	68
5	CONCLUSÃO.....	70
6	REFERÊNCIAS.....	71
7	ANEXOS.....	81
7.1.	Anexo I - ARTIGO(S) SUBMETIDO(S)	81
7.2.	Anexo II – RESULTADOS DESCRITIVOS	83
8	PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S).....	86
8.1.	Artigo submetido	86
8.2.	Protocolo analítico de destinação de resíduo de dragagem.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- A) Posicionamento das quatro lagoas anaeróbias e posicionamento dos sacos de geotêxtil. B) Draga de varredura usada na operação.....	40
Figura 2 - Figura A: Hidrojateamento com “geobag” cheio para impedir a colmatção dos poros do tecido. Figura B: Vista frontal dos “geobags” cheios.	41
Figura 3 - Porcentagem de germinação para cada concentração no teste de germinação com sementes de <i>Lactuca sativa</i>	49
Figura 4 – A - Figura 3 – Valores de média e desvios padrão do comprimento de raiz (A) e do índice de germinação (B) para cada concentração no teste de germinação com sementes de <i>Lactuca sativa</i>	50
Figura 5 - Pesos 1, 2, 3 e peso constante para cálculo de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis.	52
Figura 6 – Valores médios e seus respectivos desvios, dos resultados das análises dos sólidos totais, fixos e voláteis.	53
Figura 7 - Comprovante de submissão do artigo a revista.....	82
Figura 8 - Valores de concentração média, desvio padrão e limites regulatórios, para os metais analisados nas amostras expressos em mg.Kg ⁻¹	83
Figura 9 - Valores de concentração média, desvio padrão e limites regulatórios, para os metais analisados nas amostras expressos em mg.Kg ⁻¹	84
Figura 10 - Concentração média e desvios padrão, dos macro nutrientes expressos em mg.Kg ⁻¹ , detectados na amostra composta (lodo12).	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto para substâncias inorgânicas na aplicação agrícola de lodo de esgoto, segundo CONAMA 375/2006 (mg.Kg ⁻¹ , base seca). IN 7 do MAPA/2016 que determina os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo.	34
Tabela 2 - Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos.....	35
Tabela 3 - Variáveis e metodologias das análises para classificação do lodo de esgoto.	42
Tabela 4 - Pesos para análise de metais.....	43
Tabela 5 - Valores de concentração média, desvio padrão e limites regulatórios, para os metais analisados nas amostras de lodo analisadas em mg.Kg ⁻¹	46
Tabela 6 – Concentração dos parâmetros biológicos analisados nas 3 réplicas da amostra composta de lodo de esgoto, juntamente com os limites regulatórios das legislações nacionais e o enquadramento da classe deste resíduos sólido.	48
Tabela 7 - Concentração média e desvios padrão, dos macro nutrientes expressos em mg.Kg ⁻¹ , detectados na amostra composta (lodo12).	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
GEE - Gases de Efeito Estufa
GNV - Gás Natural Veicular
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
mg kg⁻¹ - miligrama por quilograma
NMP - Número mais provável
pH - Potencial hidrogeniônico
PRAD - Planos de Recuperação de Áreas Degradadas
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SST - Sólidos suspensos totais
ST - Sólidos totais
SV - Sólidos voláteis
USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas ambientais da atualidade, proveniente das atividades antrópicas é a exorbitante produção de lodo, associado com as estações de tratamento de esgoto (GONZALEZ et al., 2019). Na Europa, o número crescente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) produz mais de 7,5 milhões de toneladas de lodo por ano (em base seca) pelos diferentes Estados-Membros, sendo um dos efeitos decorrente da Diretiva 91/271 / CEE do Conselho Europeu, relativa ao tratamento de águas residuais urbanas (COLLIVIGNERI et al, 2019). Segundo Andreoli et al., (2001) a estimativa de geração de lodos de esgoto no Brasil está em 220 mil toneladas de matéria seca por ano.

Os sistemas de tratamento de esgoto geram uma significativa quantidade de resíduo sólido, que geralmente são negligenciados nos países em desenvolvimento, sendo descartados sem tratamento em cursos de água (IADC, 1997). Como a produção do lodo ocorre pelo processo de digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, há presença de elevado teor de material orgânico com poder fertilizante, por conter elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas, tais como Fósforo, Nitrogênio e Potássio, possuindo uma aplicabilidade elevada na agricultura (SANTOS, 2009).

A dragagem é uma técnica de engenharia usada para remoção de materiais, solos, sedimentos e rochas no fundo de corpos aquáticos, com o auxílio de equipamentos chamados de dragas (IHC, 2019). Fenili (2012) cita quatro principais tipos de atividades de dragagem: as de implantação e aprofundamento, que aprofundam canais para a navegação; as de manutenção, que garantem a profundidade em função do assoreamento natural, permitindo a navegabilidade; a de mineração para extração de minérios; e a de recuperação ambiental com objetivo de limpeza de áreas contaminadas. As dragas mais utilizadas são conhecidas como: dragas de sucção e recalque (CSD); dragas auto transportadoras (TSHD); e dragas tipo *backhoe* (BH). A definição do equipamento utilizado ocorre em função das características do local, distância da área de despejo e principalmente as características geológicas do material que será dragado, como tipo de solo, granulometria, plasticidade e resistência a penetração (IHC, 2019).

Como qualquer ferramenta, o processo de dragagem pode ter impactos positivos como a remediação de interferências de passivos no meio ambiente, no entanto, pode gerar alterações ambientais em função da natureza da operação, como turvamento da

água, ruídos, e o despejo de sedimentos, que representam os principais impactos negativos associados com processo de dragagem (IADC, 1997; LIMA, 2008).

Os sedimentos são considerados um compartimento de acumulação de substâncias, contaminantes e poluentes a partir da coluna d'água, devido às altas capacidades de sorção e acumulação, apresentando concentrações em várias ordens de grandeza maiores do que nas águas, sendo um bom indicador de poluição ambiental (JESUS et al, 2004). O sedimento dragado de lagoas anaeróbias (provenientes de estações de tratamento de esgoto) classificado como lodo de esgoto, consiste basicamente de material particulado com granulometria variando de fino a muito fino com retenção hídrica, de origem biogênica produzido como resultado da decomposição da matéria orgânica dos dejetos e de nutrientes, metais pesados e patógenos, além de outros elementos (SANTOS, 2003)

Como alternativa a este material dragado que não pode ser disposto no ambiente, surge o acondicionamento deságue do material em “*geobags*”. Constituído de geotêxtil, o “*geobag*” possui como características a alta resistência associada com alta capacidade de vazão, permitindo a drenagem, enquanto os sólidos são contidos. O tecido geotêxtil é capaz de desaguar materiais com altos teores de umidade, aproveitando suas propriedades de retenção da parte sólida e livre passagem da parte líquida (CASTRO, ESCOBAR, MARTINS, 2008). Esta tecnologia foi desenvolvida para atender o mercado da gestão de resíduos sólidos pela desidratação sendo empregado na contenção de lodos e sedimentos provenientes de lagoas de tratamento de efluentes, como também em obras subaquáticas e de engenharia costeira. O processo de preenchimento das “*bags*” se dá por bombeado fazendo com que os sólidos se aglutinem formando grumos, permitindo com que haja uma separação entre a parte líquida da sólida, até que após desidratado, mais de 99% dos sólidos ficam retidos no “*geobags*”.

França et al. (2011) constataram ausência de ovos de helmintos viáveis, *salmonelas*, protozoários e coliformes termotolerantes (indicadores patogênicos) em lodo desaguado, acondicionado em “*bag*” após seis meses. A tecnologia dos “*geobags*”, apresenta vantagens, pois atuam na secagem térmica, como explica Andreoli (2001), o material final fica praticamente livre de patógenos, e preservando as propriedades químicas e mineralógicas do material. Como o material tem grande teor de matéria orgânica, característica que agrega valor ao produto, favorece sua utilização na agricultura. O principal problema quanto à disposição e reutilização de sedimentos dragados, mesmo que contidos em “*geobags*”, consiste na possível presença de metais

pesados, contaminantes orgânicos e patógenos, capazes de provocar sérios danos à saúde humana, a flora e a fauna terrestre (FRANÇA, 2010; TRIBALLI, 2008). Daí surge a necessidade avaliação e análises físico-químicas, microbiológicas e toxicológicas desses materiais, a fim de garantir segurança nas aplicações.

Metais pesados são elementos químicos que em determinadas concentrações e tempo de exposição, oferecem risco a saúde e ao meio ambiente, como, por exemplo Prata (Ag), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Antimônio (Sb), Selênio (Se) e Zinco (Zn). Embora alguns sejam necessários para o metabolismo de determinados organismos, alguns são prejudiciais à saúde, acima de quantidades específicas, como As, Co, Cr, Cu, Se e Zn; outros como Pb, Hg e Cd são prejudiciais em qualquer concentração (GODOI, 2008).

O descarte de resíduos industriais e urbanos representa uma grande via de entrada de metais no ambiente, que normalmente possuem um comportamento conservativo, ou seja, não sofrem alterações durante o processo de mistura de águas doces e marinhas, aqueles elementos que não precipitam (OLIVEIRA & MARINS, 2011). O uso do lodo de esgoto sem sua prévia caracterização pode causar a acumulação de metais pelas plantas e animais, promover a inserção destes contaminantes na cadeia trófica, podendo causar efeitos na saúde humana, além de disseminar os contaminantes nos ecossistemas (SANTOS, 2009).

Neste contexto, a ciência que estuda os efeitos das substâncias naturais ou sintéticas sobre os organismos vivos, animais ou vegetais, terrestres ou aquáticos, incluindo assim a interação das substâncias com o meio nos quais os organismos vivem é denominada de ecotoxicologia. Ensaio ecotoxicológicos estão comumente associados ao entendimento das inter-relações entre concentrações, efeitos tóxicos e possíveis alterações que influenciam a qualidade ambiental dos ecossistemas. Diversos tipos de organismos são utilizados na avaliação da toxicidade, como, por exemplo, o ensaio de germinação analisando o desenvolvimento de espécies vegetais sob determinada concentração do composto alvo (CAMPAGNA, 2005; SANTOS, 2009; CESAR, 2014; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2006).

Em diversos estudos realizados com lodo de esgoto foi constatado a presença de metais potencialmente tóxicos, aumentando a persistência em solos ou na vegetação; emissões de gases de efeito estufa (por exemplo, metano - CH₄ e óxido nitroso - N₂O) e a liberação de compostos odoríferos, contaminantes orgânicos (alguns deles compostos orgânicos persistentes, resíduos farmacêuticos e cosméticos), além

de ser uma fonte significativa de poluição micro plásticos no ambiente (COLLIVIGNERI et al, 2019; SANTOS et al, 2020; LI, 2018).

A presença de metais tóxicos, contaminantes orgânicos e microorganismos patogênicos, constituem um dos principais aspectos críticos na disposição sustentável dos sedimentos de dragagem. Uma vez dispostos sobre os solos, além do risco de contaminação do lençol freático, a incorporação de contaminantes pela fauna edáfica e vegetais, pode favorecer a inserção destes poluentes na cadeia trófica terrestre, inviabilizar o consumo humano de vegetais e alterar a atividade microbiana do solo (CESAR, 2014).

Os microorganismos patogênicos como helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias, apresentam grau de risco definido em função da alta frequência de parasitismo na saúde da população. Quando o lodo de esgoto não tratado é utilizado em processos de disposição sobre solos, os patógenos podem ficar na superfície do solo e dos vegetais, na qual o tempo de sobrevivência dos mesmos fica condicionada por fatores como pH do solo, incidência de luz solar, temperatura ambiente, dentre outros. Um ovo de helminto pode sobreviver até 14 anos no solo e a quantidade de patógenos no lodo é definida em função das características do esgoto bruto e do sistema de tratamento utilizado, que concentra maior carga de microorganismos (SANTOS, 2003).

O lodo de esgoto é uma fonte de nutrientes para as plantas, desde que sua aplicação no solo seja feita de acordo com as normas vigentes. Para isso, os resultados da caracterização fornecem uma base de dados para avaliar se o material é adequado como alternativa de disposição ou reaproveitamento (EMBRAPA, 2004; SIMÃO, 2009).

A caracterização do lodo de esgoto conforme as legislações consultadas e a direção do material para o uso agrícola é de suma importância, quando abordamos as questões de sustentabilidade nos processos de tratamento de efluentes. Nesse sentido, esse documento serve como base para a elaboração de um Produto de Protocolo de caracterização de lodo de esgoto dragado de sistema tratamento de efluentes, de modo a subsidiar novas operações de reutilização e dar o melhor destino ao resíduo do impacto inerente a operação de dragagem.

1.1. Embasamento legal do uso do sedimento da dragagem

De acordo com a Resolução nº 375 de 2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, o material particulado proveniente de estação de tratamento de efluentes é denominado de lodo de esgoto, enquanto que biossólido é a denominação do lodo de esgoto, tratado ou processado, com características que permitam sua reciclagem de maneira racional e ambientalmente segura. Após a caracterização do lodo de esgoto, pode-se seguir com a gestão do resíduo, dando a ele uma finalidade e uso ambientalmente corretos. O uso benéfico do material dragado se caracteriza como a utilização do material, no todo ou em parte, como recurso material em processos produtivos que resultem em benefícios ambientais, econômicos ou sociais, sem gerar degradação ambiental, como alternativa à sua mera disposição no solo ou em corpo de água (BRASIL, 2012).

A versatilidade de alternativas de uso, bem como os benefícios ambiental, social e econômico deste material contribuem para validar o uso de lodo de esgoto como recurso/insumo (HERMANNNS, 2017). No caso de material dragado contaminado, o número de alternativas fica reduzido ou condicionado ao tratamento prévio, tendo em vista as restrições ambientais à sua disposição. Mesmo nos casos em que o nível de contaminação não obrigue a disposição em aterros controlados, pode ser necessária a adoção de medidas mitigadoras dos impactos sobre o meio ambiente, através do emprego de técnicas de manejo da disposição, estruturas de retenção de contaminantes ou tratamento do material (SIMÃO, 2009).

Dependendo da composição e granulometria dos sedimentos dragados, eles podem ser usados para construção civil, agricultura, indústria cimenteira, recuperação de áreas degradadas, ou até mesmo para melhorias ambientais. As opções mais viáveis, em função dos aspectos ambientais, econômico, técnico e operacional, são o uso agrícola e a disposição em aterro sanitário ou industrial licenciado, pois as demais alternativas: incineração, biomassa para energia, fabricação de materiais de construção, são empregadas de forma incipiente no Brasil. Os Estados Unidos produzem cerca de 13 milhões de toneladas por ano de lodo de esgoto e a Europa cerca de 16 milhões de toneladas por ano. Desse total de lodo produzido, 29 milhões de toneladas por ano, cerca de 40% têm como disposição final os aterros sanitários, 30% uso agrícola, 11 a 16% são incinerados, e o restante em recomposição de áreas degradadas/reflorestamento, disposição oceânica e outras formas de disposição (SIMÃO, 2009; ANDREOLI, 2001; FRANÇA, 2010).

Atualmente na Europa, a aplicação agrícola representa a principal via de destinação de lodo de esgoto, com 50% espalhado em solos agrícolas, 28% incinerado

e 18% descartados em aterros. As principais opções de despejo incluem: áreas de armazenagem controladas, aterros controlados, cobertura de aterros, mistura com outros resíduos e principalmente para uso agrícola. Pesquisas sobre o uso do lodo de esgoto como fertilizante em áreas agrícolas e florestais estão bastante desenvolvidas, principalmente em alguns países da América do Norte e Europa. Na Alemanha, grande parte ou todo o lodo gerado nas ETEs é utilizada em escala operacional nas plantações florestais (COLLIVIGNARELLI et al, 2019; IADC, 1997, TRIBALLI, 2008).

A rápida oxidação da matéria orgânica dos solos tropicais é mais uma evidência da grande vantagem do uso de lodo de esgoto como condicionadores de solo, capazes de melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo com grandes reflexos na produtividade agrícola. O uso de lodo de esgoto na agricultura representa uma alternativa de disposição final que apresenta menores impactos ambientais negativos, desde que sejam observados o conteúdo de metais pesados, lixiviação de Nitrogênio e sua eficácia no sistema de higienização (ANDREOLI, 2001; FRANÇA, 2010).

A qualidade dos solos está descrita na Resolução 420 do CONAMA de 2009, em que o “valor de referência” deve ser estabelecido com base em cada Estado da Federação, devido a características inerentes à geologia e à pedologia regional (BRASIL, 2009). Os valores de “prevenção” e “intervenção”, estipulados estão baseados em avaliação de risco ecológico e à saúde humana, respectivamente. A Resolução nº 454 do CONAMA de 2012 (único documento deliberando sobre a qualidade de sedimentos no Brasil) estabelece as diretrizes para a disposição de sedimentos de dragagem no Brasil, incluindo a sua disposição terrestre, em solos (BRASIL, 2012).

A caracterização se fundamenta na Resolução 375 do CONAMA de 2006 (BRASIL, 2006), que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Segundo essa mesma resolução a caracterização do lodo de esgoto deve incluir: potencial agrônomo; substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas (Tabela 1); indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos (Tabela 2); e estabilidade.

A Lei nº 6.894/1980 dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura e atribui ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) a competência para a fiscalização (MAPA, 1980). O Decreto nº 4.954 de 2004, define como fertilizante orgânico composto: produto obtido por processo físico, químico, físico-

químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas (MAPA, 2004).

Ainda se tratando de uso agrícola, a Instrução Normativa IN nº 25 de 2009 de normatiza as especificações e as garantias, tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura, além de classificar o lodo de esgoto como matéria prima proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários, possibilitando um produto de utilização segura na agricultura (MAPA, 2009). A Instrução Normativa IN nº 07 de 2016 atualizou os limites máximos de contaminantes admitidos em substrato para plantas, estabelece limites de agentes fitotóxicos, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para plantas (MAPA, 2016).

A Instrução Normativa IN nº 07 de 2016 (Tabela 1), estabelece os limites para contaminantes, determina limites máximos admitidos em substrato para plantas, de agentes fitotóxicos, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para plantas (MAPA, 2016).

Os parâmetros internacionais da Diretiva 86/278/EE, foram levantados para fins de comparação, supondo para investigação mercadológica, considerando possibilidades de utilização em países da Europa.

Tabela 1 - Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto para substâncias inorgânicas na aplicação agrícola de lodo de esgoto, segundo CONAMA 375/2006 (mg.Kg⁻¹, base seca). IN 7 do MAPA/2016 que determina os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo.

Parâmetro	CONAMA 375/2006	IN 7/2016	Diretiva 86/278/EEC
Arsênio	41	20	SE
Bário	1300	SE	SE
Cádmio	39	3	20-40
Chumbo	300	150	750 -1200
Cobre	1500	SE	1000 -1750
Cromo	1000	2	SE
Merúrio	17	1	16-25
Molibdênio	50	SE	SE
Níquel	420	70	300 -400
Selênio	100	80	SE
Zinco	2800	SE	2500-4000

Fonte: BRASIL, 2006; MAPA 2016.

Entre os procedimentos estão aqueles relacionados ao licenciamento, à frequência de monitoramento do lodo, à elaboração de projeto agrônômico e às condições de manuseio, transporte e aplicação do material. O documento também estabelece critérios para culturas e áreas agrícolas aptas a receber o material, para restrições locacionais, para definição de dose de aplicação e para o monitoramento das áreas de aplicação. Entre os requisitos de qualidade do lodo, são definidos limites máximos de concentração para agentes patogênicos, indicadores bacteriológicos e contaminantes inorgânicos (BITTENCOURT, AISSE & SERRAT, 2017).

Sampaio (2013) cita que os padrões microbiológicos da classe A são exatamente os mesmos dos fixados pela legislação norte americana, *United States Environmental Protection Agency* – USEPA 40 CRF Part 503 (USEPA, 1997). Entretanto, estabelece uma série de restrições para o uso de lodo dessa classe, podendo se destacar:

- A proibição do uso em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, como demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo;
- A utilização em pastagens em períodos inferiores a 24 meses;
- A proibição de aplicação em solos que irão ser utilizados para culturas de olerícolas, tubérculos, raízes e demais culturas cuja superfície entre em contato com o solo bem como cultivos inundáveis, em períodos inferiores a 48 meses.

Para fins de possível utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70. A aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados no solo agrícola somente poderá ocorrer mediante a existência de uma liberação devidamente licenciada pelo órgão ambiental competente. Já a classe é definida conforme concentração de patógenos (Tabela 2).

Tabela 2 - Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos.

Tipo do lodo	Concentração de patógenos
A	1.000 NMP/g ST Coliformes Termotolerantes; < 0,25 ovo / g de ST helmintos; ausência em 10 g de ST <i>Salmonella</i> ; < 0,25 UFP ou UFF / g de ST Vírus
B	< 10 ⁶ NMP / g de ST Coliformes Termotolerantes; < 10 ovos / g de ST ovos viáveis de helmintos

Fonte: CONAMA 375/2006.

A Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006) também exige a caracterização do lodo para substâncias orgânicas potencialmente tóxicas, em que são listadas 34 substâncias que devem ser monitoradas no lodo, sem, entretanto, estabelecer o limite

máximo permitido para cada uma delas. Sampaio (2013) cita que a legislação europeia, como a norte americana optaram pela não exigência de monitoramento e fixação de limites máximos destas substâncias no lodo devido a estudos realizados pela Agencia Ambiental Norte Americana - EPA demonstraram que substâncias orgânicas não se encontram em grande quantidade no lodo de esgoto produzido nos Estados Unidos da América e que seus efeitos adversos à saúde pública decorrentes da prática de disposição agrícola não são tão importantes.

Camargo (2006) cita que a norma P4230 da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, foi fundamentada na(s) normativa(s) da USEPA 503 (USEPA, 1997). Entretanto, Collivignarelli et al (2019) explicam que os requisitos regulatórios sobre o conteúdo de patógenos em lodo de esgoto ainda permanecem bastante limitados na legislação da maioria dos países. Países como França e Espanha, prescrevem a análise de parâmetros agrônômicos, já apenas a Itália estabelece valores mínimos para matéria orgânica. Já Suécia e Letônia fornecem uma taxa anual máxima de Nitrogênio e/ou Fósforo que pode ser espalhada em solo. No que diz respeito aos solos em que é proibida a utilização de lodo de esgoto, a Diretiva 86/278/CEE estabelece restrições relativas à propagação de material em pastagens e em terras onde são cultivados vegetais para consumo e frutas.

De um modo geral o limite máximo de concentração de substâncias químicas dos países da Europa representa o nível de carga máxima de modo a evitar o acúmulo, enquanto os valores fixados na legislação Americana visam basicamente à prevenção de efeitos nocivos à saúde pública, plantas e outros animais (SAMPAIO, 2013). A Resolução CONAMA 375 fez a opção pela metodologia de análise de risco proposta pela legislação americana USEPA 40 CRF, Part 503, porém alguns parâmetros como o Bário, Crômio e Molibdênio foram baseados em valores de referências estabelecidos através de estudos simplificados de caracterização de solos do Estado de São Paulo.

1.2. Potencial de emissões atmosféricas

Por se tratar de um material com elevado teor de matéria orgânica decomponível, é considerado uma fonte significativa de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). O lodo disposto sem uso específico gera emissões atmosféricas e o descarte inadequado de lodo na China levou a emissões de GEE consideráveis e não ordenadas (LIU *et al.*, 2016).

No Brasil, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP em Franca - SP, possui um projeto que transforma o lodo de esgoto em combustível, sendo o metano puro, resultante do processo de decomposição e filtragem, utilizado da mesma forma que o Gás Natural Veicular - GNV. Em Curitiba (PR), uma parceria-público-privada resultou em uma Unidade de Tratamento de Esgoto que transforma lodo de esgoto em energia elétrica, na qual lodo de esgoto e restos de alimentos são misturados na biodigestão, e convertidos em biogás (COELHO *et al.*, 2019). Grando *et al.* (2017) afirmam que a digestão anaeróbica na produção de biogás constitui hoje em uma forma sustentável de uso da biomassa, com recuperação de nutrientes e redução das emissões de GEE.

Outro importante aspecto está no processo relacionado com a mineralização de resíduos orgânicos no solo, produzindo amônio que pode ser retido pelo solo, absorvido pelas plantas ou convertido em Nitrato. O Nitrato, por sua vez, pode ser absorvido pelas plantas, lixiviado para fora da zona de absorção das raízes ou ser convertido a Nitrogênio gasoso e perdido para a atmosfera (GODOI, 2008).

A destinação para fins agrícolas, além de reduzir as emissões, “diluindo” em uma área maior, contribui para o crescimento dos vegetais, que consomem o Carbono atmosférico, promovendo um ganho potencial ampliado no saldo de sequestro de Carbono atmosférico. Ao acionar a biocenose do solo, ocorrerá constituição de biomassa, e por consequência, sequestro de Carbono. Para cada 1 kg de matéria orgânica humificada formada no solo, 3,67 Kg de Carbono são fixados. Estimativas indicam que se aumentarmos em 1% o teor de matéria orgânica no solo das áreas agricultáveis do planeta, os níveis de CO₂ na atmosfera poderiam retornar aos níveis da era pré-industrial (MACHADO, 2004).

1.3. Justificativa

A operação de dragagem é ferramenta fundamental para o desenvolvimento das atividades econômicas e dar destinação correta aos sedimentos, evita contaminações e diversos tipos de impactos negativos ao meio ambiente. Segundo Corrêa (2007), uma população urbana de cem mil habitantes gera aproximadamente treze milhões de litros de esgoto por dia, que acarretam a produção de sessenta toneladas de lodo de esgoto,

e estima-se que cada metro cúbico de esgoto tratado produz entre três e cinco quilos de lodo de esgoto. Destinar lodo de esgoto de forma econômica, higiênica, ambientalmente aceitável e não poluente é premissa básica em centros urbanos que possuem um sistema de coleta e de tratamento de esgotos.

A reciclagem agrícola de lodo de esgoto representa uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente segura. O material orgânico presente aumenta a resistência dos solos à erosão, é fonte de nutrientes como Nitrogênio e Fósforo constituindo-se em boa alternativa para regiões agrícolas, especialmente aquelas caracterizadas pelo uso intensivo do solo ou em que há a proposição de técnicas de reflorestamento, trazendo retorno econômico para a atividade agrícola. A vantagem em termos climáticos está na utilização de produtos derivados de biomassa de origem renovável, recicla-se o Carbono, reduzindo as emissões e compostos nocivos. A reciclagem agrícola contribui com o ciclo bioquímico dos nutrientes minerais, fornecendo matéria orgânica ao solo, estocando, assim, o Carbono na forma de compostos estáveis e não liberando CO₂ na atmosfera (ANDREOLI, 2001; FREDDO, 2014).

Os ambientes anóxicos são geradores de GEE enquanto mais saturados, maior a emissão. Logo, a dragagem dos sedimentos, além de recuperar a eficiência do sistema de tratamento de efluentes, vem como uma alternativa de compensação das emissões da lagoa anaeróbia. Neste sentido, entende-se como importante o estudo do lodo de esgoto, caracterizando e apresentando um descarte que possibilite o uso ambientalmente adequado de acordo com suas características químicas e biológicas e que também possam contribuir para a redução das emissões de GEE. Ainda, a investigação do lodo de esgoto em um estudo de caso como este, permite incrementar o conhecimento acerca deste material e contribuir para a indicação de disposição final adequada em outros casos.

1.3 Objetivos

Geral

Realizar a caracterização química e biológica do lodo dragado de quatro lagoas anaeróbias de uma estação de tratamento de esgoto e acondicionados em tubos de geotêxtil, avaliando alternativas de disposição final.

Específicos

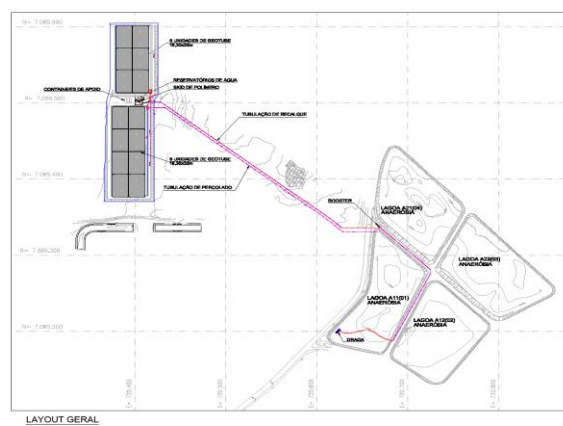
- Caracterizar o lodo de esgoto confinado e desaguado quanto à presença de substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas (metais);
- Caracterizar o risco biológico através da presença de agentes patogênicos (vírus entéricos, ovos de helmintos, *Samonella* e coliformes termotolerantes);
- Caracterizar a toxicidade do solubilizado para vegetais através do ensaio de germinação de *Lactuca sativa*.
- Avaliar a adequação para aplicação agrícola do bio sólido previamente caracterizado.

2. METODOLOGIA

2.1 Procedência do lodo

O lodo estudado é proveniente da estação de tratamento de esgoto de Joinville, operada pela Companhia de Águas de Joinville, responsável pelo tratamento de efluentes do município. A empresa Allonda, usuária da tecnologia de “*geobags*” no Brasil, foi responsável pela dragagem das quatro lagoas anaeróbias (Figura 1- A), da Companhia de Águas de Joinville da ETE Jarivatuba. A remoção de sedimento foi estimada por batimetria, em 42.983 m³. A draga utilizada (Figura 1- B) foi de sucção e recalque, que tem um cortador rotativo na extremidade de sua lança e sua varredura é lateral, alternando de bombordo para boreste e boreste para bombordo.

Figura 1- A) Posicionamento das quatro lagoas anaeróbias e posicionamento dos sacos de geotêxtil. B) Draga de varredura usada na operação.



Fonte: Relatório gerencial cedido pela empresa Allonda Ambiental.

Todo material recalcado foi depositado primeiramente em um tanque, onde foram adicionados um polímero floculante aniônico (Superfloc a-100), um composto orgânico sintético de alto peso molecular com composição química a base de poliacrilaminas ou poliacrilatos de carga variada, utilizado para aglomerar os sedimentos em função do seu diâmetro. Após um tempo determinado o material é transferido por bombeamento para os “geobags”. Em virtude do processo de acolmatação dos poros, o bombeamento não pode ser contínuo. Então um processo de hidrojateamento (Figura 2 - A) e/ou vibração na parte externa dos “geobags” são empregados para auxiliar no desague. Após a execução desses procedimentos operacionais, o enchimento pode ser reiniciado e esses processos se repetem até o que o volume máximo do bag seja alcançado (Figura 2 - B).

Figura 2 - Figura A: Hidrojateamento com “geobag” cheio para impedir a colmatação dos poros do tecido. Figura B: Vista frontal dos “geobags” cheios.



Fonte: Relatório gerencial cedido pela Allonda Ambiental.

2.2 Coleta do material

A coleta do lodo de esgoto foi realizada em 12 “geobags” com 18,3 m de largura por 30 m de comprimento e 2,7 m de altura. As amostras foram coletadas em maio de 2019, em um ponto, localizado na flange de abertura. Foram coletadas aproximadamente 100 gramas de cada um dos “geobags”, de acordo com a Norma Brasileira NBR nº10.007 - Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004). As amostras foram homogeneizadas, *in loco*, formando uma amostra composta (lodo12), e então armazenados em sacos plásticos. A caracterização foi baseada nos resultados analíticos de três réplicas de lodo12.

2.3 Caracterização do lodo de esgoto

Os critérios para as análises de lodo¹² e apresentação dos resultados seguiram sequência descrita abaixo, e analisando os parâmetros físicos, químicos e biológicos de acordo com as respectivas metodologias (tabela 3).

1. Determinação de substâncias inorgânicas Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Selênio (Se) e Zinco (Zn) nas amostras de lodo de esgoto.
2. Determinação de indicadores microbiológicos e patogênicos: Coliformes termotolerantes, *Salmonella*, ovos viáveis de helmintos, vírus entéricos.
3. Determinação do potencial de uso agrônômico do lodo de esgoto como adubo: Carbono orgânico, Nitrogênio Total, Nitrogênio Amoniacal, Nitrogênio Nitrato/Nitrito, Fósforo total e Sólidos voláteis e Sólidos Totais no lodo de esgoto.

Tabela 3 - Variáveis e metodologias das análises para classificação do lodo de esgoto.

Variável	Metodologia
Metais: Al, Ar, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn	U.S.EPA SW-846 métodos: 3050 e 3051
Carbono orgânico	BIGHAM (1996); NELSON & SOMMERS, (1996)
N Amoniacal e N total	BREMNER (1996)
N Nitrato/Nitrito	MULVANEY (1996)
P total	KUO (1996)
Coliformes termotolerantes	EPA/625/R-92/013, 2003; CETESB L5-406, 1992.
<i>Salmonella sp</i>	Standard Methods (APHA, 1995); EPA/625/R-92/013, 2003;
Ovos de helmintos	Standard Methods (APHA, 1995); EPA/625/R-92/013, 2003;
Vírus entéricos	CETESB-L5-504 e 506, 1988, EPA/625/R-92/013;
Sólidos totais, voláteis	SABESP NTS 013/1999
Ensaio de germinação	Ecological Effects Teste Guidelines OPPTS 850.4200 – Seed Germination / Root Elongation Toxicity Teste (USEPA, 1996)

Fonte: Autor.

2.3.1. Análise de Metais

A análise de metais foi realizada em parceria com a Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), no laboratório de Oceanografia Química e Poluição Marinha. Para a análise as amostras foram descongeladas, homogeneizadas em cadinhos e secas

durante dois dias em estufa a 60° C. Após este procedimento foram maceradas e uma fração de 15 g foi separada e peneiradas em malha de diâmetro inferior a 0,5 mm, resultando três frações de amostra.

Posteriormente foi realizada a digestão ácida a quente, usando 2 mL de ácido clorídrico (HCl) e 2 mL de ácido fluorídrico (HF). A solução obtida foi então aquecida até secar em chapa a 120° C, sendo redissolvida com ácido nítrico 0,2% (HNO₃) para medição em espectrômetro de Absorção Atômica por chama (Perkin Elmer 3110). Todas as concentrações foram expressadas em peso seco.

Tabela 4 - Pesos para análise de metais.

Amostra	Peso (g)	Peso (g) para análise
#1	6,5	1,0232
#2	6,3	1,0023
#3	5,8	1,0488

Fonte: Autor.

2.3.2. Ensaio de germinação e desenvolvimento de radícula de sementes

Neste experimento foi seguida a Norma USEPA - *Ecological Effects Teste Guidelines* OPPTS 850.4200 – *Seed Germination / Root Elongation Toxicity Teste* (USEPA, 1996) que avalia o efeito fitotóxico de soluções aquosas no processo de desenvolvimento das raízes das plântulas nos primeiros cinco dias de alongamento. Diversos estudos utilizam a *Lactuca sativa* (alface) como indicador de toxicidade, pois está na lista de organismos descritos na padronização do teste feito nos Estados Unidos (USEPA, 1996).

A metodologia adotada foi a mesma aplicada por Polleti et al. (2017), com auxílio de pinça as 20 sementes de *Lactuca sativa* foram dispostas para germinar em placa de Petri com papel de filtro, saturado com 3 a 4 mL da diluição da amostra a ser testada. O experimento foi realizado em triplicata para cada tratamento (T1, T2, T3, T4 e T5), que correspondiam à 100%, 50%, 25%, 12,5%, 6,25% de solubilizado de lodo, diluído em água mili-Q. A solução de lodo solubilizado foi obtida a partir da homogeneização de 330 g de lodo¹² em 1.320 mL de água milli-Q, na proporção 1:4. O solubilizado foi gerado de acordo com a metodologia regulamentada pela NBR 10006 (ABNT, 2004), em que o lodo¹² ficou em contato com a água homogeneizando por 20 dias no agitador mecânico para solubilização. Para o controle positivo foi utilizado água destilada e para o controle negativo foi usada uma solução de Sulfato de zinco 1%. A placa de Petri foi vedada com plástico filme para não ocorrer perda de umidade, coberta com papel

escuro (as sementes não se desenvolvem na luz) e incubadas por 120 h a temperatura de $22 \pm 1^\circ\text{C}$ em câmara de incubação.

Foi utilizada a espécie *Lactuca sativa*, variedade “Regina de Verão”, devido a sua rápida germinação e fácil aquisição em lojas de produtos agropecuários. As sementes usadas são isentas de pesticidas, praguicidas e defensivos, e foram utilizadas somente sementes com germinação superior a 96%. Após o período de incubação, as placas de Petri contendo as diluições foram retiradas da câmara de incubação e, além da medição do comprimento da radícula com um paquímetro digital, foi quantificado o número de sementes germinadas nas amostras. Os resultados foram avaliados de acordo com os critérios estabelecidos por Tam & Tiquia (1994), determinando-se a germinação relativa das sementes (Equação 1), alongamento relativo das raízes (Equação 2), e índice de germinação (Equação 3).

Equação 1:

$$\text{Germinação} = \frac{\text{número de sementes germinadas na amostra}}{\text{número de sementes germinadas no controle}} \times 100 \quad (1)$$

Equação 2:

$$\text{Raíz} = \frac{\text{Medida de alongamento da raiz da amostra}}{\text{Medida de alongamento da raiz no controle}} \times 100 \quad (2)$$

Equação 3:

$$IG = \frac{\% \text{ de germinação de sementes} \times \% \text{ alongamento de raiz}}{100\%} \times 100 \quad (3)$$

2.3.3 Sólidos totais, fixos e voláteis

Foi utilizada a Norma Técnica Interna Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - SABESP NTS 013/1999 como metodologia para o ensaio de sólidos totais, fixos e voláteis. Os sólidos totais são as substâncias que permaneçam na cápsula após a total secagem de um determinado volume de amostra. Os sólidos fixos são todas as substâncias que permaneçam na cápsula após calcinação em forno-mufla. Considera-se o cálculo dos sólidos voláteis como o resultado da subtração entre os sólidos totais e os sólidos fixos.

A preparação do ensaio iniciou-se com a lavagem da cápsula com água destilada, secada e calcinada a 550° C por 1 hora em forno-mufla. Após, foi transferida para dessecador e a capsula esfriou até temperatura ambiente e em seguida foi pesada a amostra de lodo denominada Peso 1 (P1) em gramas. A evaporação da amostra ocorreu em um becker com a amostra homogeneizada com o auxílio de uma baguete. Foi transferida uma alíquota da amostra (com um volume de amostra pré-determinado de 50 mL) para a cápsula. Após seguiu em banho-maria, colocando em estufa (105 ± 2°C) até a determinação do peso constante. Para o peso constante, a amostra foi para a estufa por quatro vezes seguidas tendo o seu peso aferido, apenas após a quarta repetição observou-se o peso seguindo um padrão constante, então foi colocada a cápsula em dessecador e esfriou-se até temperatura ambiente e pesado o peso 2 (P2) em g.

A calcinação da amostra ocorreu após execução da etapa anterior, a cápsula foi levada com o resíduo da secagem em forno-mufla (550 ± 50°C) por 30 minutos. Transferidas as amostras para um dessecador até atingir temperatura ambiente e então pesado o peso 3 (P3) em g. Para os cálculos foram adotadas as seguintes equações determinando-se a os sólidos totais (Equação 1), sólidos fixos (Equação 2), e sólidos voláteis (Equação 3).

Equação 1:

$$\text{Sólidos Totais} = \frac{P2 - P1}{\text{vol.am}} \times 1.000.000 \quad (1)$$

Equação 2:

$$\text{Sólidos Fixos} = \frac{P3 - P1}{\text{vol.am}} \times 1.000.000 \quad (2)$$

Equação 3:

$$\text{Sólidos Voláteis} = \text{Sólidos Totais} - \text{Sólidos Fixos} \quad (3)$$

Considerando: P1= Tara da cápsula (g); P2= Cápsula com amostra após secagem (g); P3= Cápsula com amostra após calcinação (g); vol.am = Volume da amostra (mL); Expressão dos resultados em mg.L⁻¹.

2.4. Análise da adequação do lodo de esgoto para uso agrícola

A análise do potencial agronômico e sua possibilidade de uso como insumo agrícola seguiu os valores limites para metais em lodo de esgoto ou produto derivado

destinado à agricultura no Brasil pelas Resoluções do CONAMA 375 de 2006 (BRASIL, 2006) e pela IN 7 de 2016 (MAPA, 2016), contendo os limites máximos de contaminantes admitidos em substratos para plantas/condicionadores de solo e a classificação do lodo de esgoto ou produto derivado segundo agentes patogênicos. Os resultados obtidos também foram confrontados com os parâmetros internacionais da Diretiva 86/278/EE, tanto para fins de comparação, como para investigação mercadológica, considerando possibilidades de utilização em países da Europa.

2.5. Análises estatísticas

Os resultados foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos a diferentes testes estatísticos para avaliar a representatividade da amostra composta (lodo12), para cada parâmetro analisado e seu potencial agronômico, adotando um nível de significância de 95% ($p < 0,05$). Utilizando o software SigmaPlot v11, foi realizado primeiramente uma análise da variância (ANOVA), seguido pelo teste de Tukey, para testar a representatividade das réplicas dentro da amostra composta e o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn, e confirmado pelo teste U de Mann-Witney, adotado para avaliar o ensaio de germinação.

3 RESULTADOS

3.1. Análises de metais

Na tabela 5 estão representadas as concentrações médias com seus respectivos desvios padrão, para todos os metais na amostra composta de lodo12 e os limites regulatórios estabelecidos pelas normas jurídicas CONAMA 375 (BRASIL, 2006) e IN 07 (MAPA, 2016).

Tabela 5 - Valores de concentração média, desvio padrão e limites regulatórios, para os metais analisados nas amostras de lodo analisadas em mg.Kg^{-1} .

Elementos	Concentração média (mg.kg^{-1})	$\pm$ Desvio padrão médio	CONAMA 375/2006 (mg/kg^{-1})	MAPA IN 7/2016 (mg/kg^{-1})
Alumínio	2.341,17	$\pm 314,61$	SE	SE

Arsênio	0,001	± 0	41	20
Bário	47,02	± 4,3	1300	SE
Cádmio	0,44	± 0,01	39	3
Chumbo	7,69	± 6,29	300	150
Cobre	70,52	± 59,83	1500	SE
Cromo	14,03	± 16,34	1000	2
Ferro	4.510,47	± 880,43	SE	SE
Mercúrio	0,001	± 0	17	1
Molibdênio	0,03	± 0	50	SE
Níquel	7,55	± 6,2	420	70
Selênio	0,44	± 0,01	100	80
Zinco	158,96	± 131,76	2800	SE

Fonte: Autor.

Na caracterização, a concentração de Alumínio apresentou concentração média de $2,34 \pm 314,61 \text{ g.Kg}^{-1}$. As concentrações de Arsênio apresentaram valores abaixo de $0,001 \text{ mg.Kg}^{-1}$. A concentração do elemento Bário teve média de $47,02 \pm 4,3 \text{ mg.Kg}^{-1}$. Já o Cobre, elemento pode ser fitotóxico em altas doses (BETIOL & CAMARGO, 2006), apresentou média de $70,52 \pm 59,83 \text{ mg.Kg}^{-1}$. O Chumbo, elemento carcinogênico, a concentração média da amostra composta apresentou $7,69 \pm 6,29 \text{ mg.Kg}^{-1}$.

O Cromo, elemento tóxico para as plantas e animais, apresentou concentração média de $22,37 \pm 15,49 \text{ mg.Kg}^{-1}$, enquanto que o cádmio, metal que oferece grande perigo e toxicidade, a concentração foi $0,44 \pm 0,01 \text{ mg.Kg}^{-1}$, bem abaixo da legislação. Para o elemento Ferro que é essencial às plantas (FIZIOLA, SOUZA & GOMES, 2006) os resultados apresentaram média de $4.510,47 \pm 880,43 \text{ g.Kg}^{-1}$. Já para o parâmetro Mercúrio, a concentração se manteve abaixo de $0,001 \text{ mg.Kg}^{-1}$. Para o micronutriente Molibdênio, o qual não é considerado como tóxico aos humanos, a concentração média apresentou-se com valor de inferior de $0,03 \text{ mg.Kg}^{-1}$.

O Níquel, tóxico para algumas plantas e animais em altas doses (BETIOL & CAMARGO, 2006), apresentou média de $7,55 \pm 6,20 \text{ mg.Kg}^{-1}$. O Selênio apresentou valores de concentração $0,44 \pm 0,01 \text{ mg.Kg}^{-1}$. O Zinco, micronutriente essencial a algumas plantas (BETIOL & CAMARGO, 2006), apresentou concentração média de $158,96 \pm 131,76 \text{ mg.Kg}^{-1}$. Todas concentrações médias permaneceram abaixo do limite do CONAMA 357 (BRASIL, 2006) e MAPA (2016).

Os resultados de Chumbo, Cobre, Cromo, Níquel e Zinco foram muito abaixo, na réplica #2, do valor das réplicas 1 e 3. Isto pode estar relacionado com o comportamento de cada elemento durante todo o processo de tratamento do resíduo que originou o

lodo. No entanto, mesmo apresentando desvios elevados para suas respectivas médias, todos os valores estiveram abaixo dos limites regulatórios vigentes.

3.2. Parâmetros microbiológicos

A caracterização do lodo de esgoto para os parâmetros microbiológicos avaliou: vírus entéricos, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e coliformes termotolerantes, para as três réplicas da amostra composta, e confrontou com os limites regulatórios estabelecidos pelas resoluções nacionais (tabela 6).

Tabela 6 – Concentração dos parâmetros biológicos analisados nas 3 réplicas da amostra composta de lodo de esgoto, juntamente com os limites regulatórios das legislações nacionais e o enquadramento da classe deste resíduos sólido.

Variável	#1	#2	#3	Unidade	CONAMA 375/2006	MAPA IN 7/2016
Vírus	0	0	0	UFF/g de ST	< 0,25 UFF/g de ST	SE
Helmintos	0	0	0	< 0,25 ovo/g de ST	< 0,25 ovo/g de ST	Até 1,000000 UFF/4g
<i>Salmonella</i>	0	0	0	Ausência em 10 g	Ausência em 10 g	Ausência 10 g de matéria seca
Coliformes termotolerantes	20	90	47	UFC/mL	1000 NMP/g de ST	Até 1000 UFC/mL

Fonte: Autor.

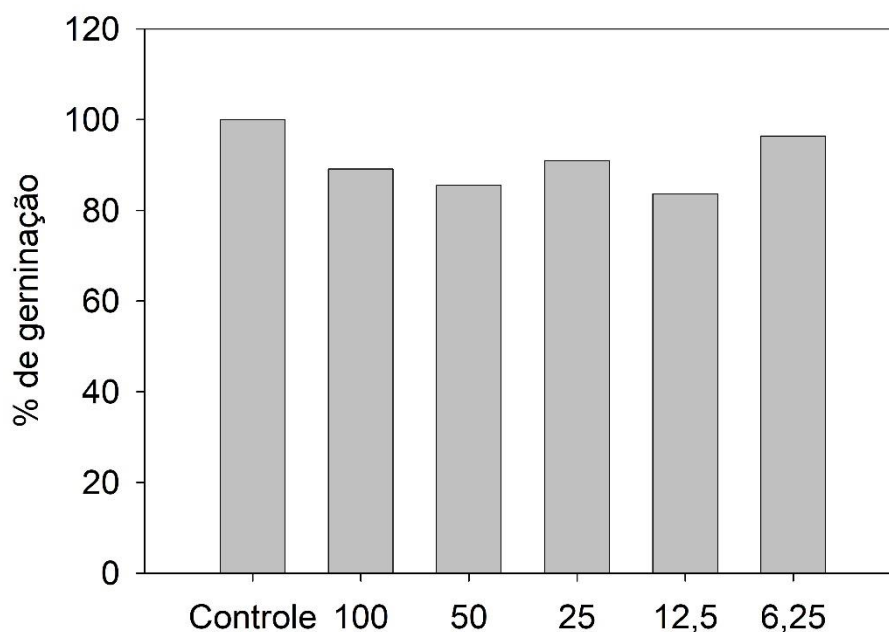
Embora todas as réplicas de lodo₁₂ para Coliformes (20 UFC/mL, 90 UFC/mL e 47 UFC/mL) tenham apresentando valores detectáveis, justificável devido a origem do material, nenhuma das réplicas da amostra de lodo 12 apresentou valores acima do permitido pelas legislações CONAMA 375 (BRASIL, 2006) e IN 07 (MAPA, 2016). Desta forma, conforme a resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006), o lodo analisado pode ser classificando como Classe A.

3.3. Ensaio de germinação

O ensaio fitotóxico de germinação consistiu na contagem das sementes germinadas e medição do crescimento da radícula da *Lactuca sativa* após cinco dias de exposição ao controle positivo e negativo, e à cinco concentrações do lodo₁₂. Todos os tratamentos apresentaram uma taxa de germinação superior a 83%. No teste com as três réplicas do controle positivo com água destilada, o percentual de germinação foi de 91,67% (considerando a média de $18 \pm 0,58$ sementes germinadas), e o comprimento

médio da radícula foi de $11,02 \pm 0,71$ mm. O controle negativo com sulfato de zinco não apresentou a germinação de nenhuma semente, como esperado.

Figura 3 - Porcentagem de germinação para cada concentração no teste de germinação com sementes de *Lactuca sativa*.



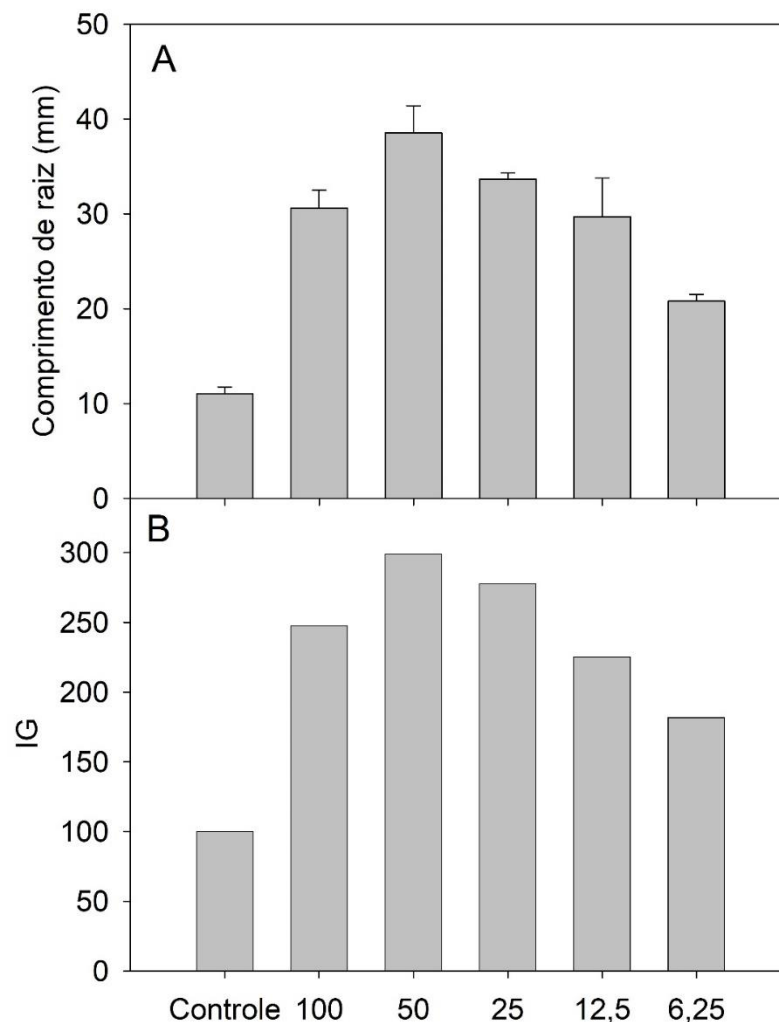
Fonte: Autor.

O maior percentual de germinação foi encontrado na concentração 6,25%, com 96,36% de sementes germinadas. Já a menor porcentagem foi encontrada na concentração 12,5% com 83,64% de sementes germinadas. Em geral, o aumento da concentração de composto não prejudicou a germinação das sementes. Em todas as concentrações, as porcentagens de germinação das sementes foram superiores a 83%.

Com relação ao comprimento da radícula (Figura 4 - A), os maiores crescimentos foram encontrados nas concentrações de 50% com $38,55 \pm 2,83$ mm, seguido pela concentração de 25% com $33,65 \pm 0,67$ mm. Já as menores medidas de crescimento de raiz, foram encontradas nas concentrações de controle com a média de $11,02 \pm 0,71$ mm e na concentração de 6,5% com $20,79 \pm 0,69$ mm.

O índice de germinação (Figura 4 - B), que expressa o resultado da razão entre o percentual de germinação e o percentual de crescimento da raiz, apresentou maior valor na concentração de 50% com índice de 298,96 unidades e com menor valor representado na concentração de 6,25%, com 181,80 unidades, após o controle.

Figura 4 – A - Figura 3 – Valores de média e desvios padrão do comprimento de raiz (A) e do índice de germinação (B) para cada concentração no teste de germinação com sementes de *Lactuca sativa*.



Fonte: Autor.

Com relação ao comprimento da radícula, os resultados demonstram que há diferença estatística entre as concentrações 12, 25, 50 e 100% em relação à concentração 6,25%. Além de todas as concentrações serem diferentes do controle.

Houve homogeneidade de variância, devido ao valor do p ser maior que 0,5000, mostrando que o experimento está condizente. O teste demonstrou que houve diferença no C2, C3, C4, C7, C8, C9, C12, C13, C15, C17, C18 que foi diferente dos demais tratamentos. Foi demonstrado que nestes tratamentos (C2, C3, C4,...) houve homogeneidade das variâncias, ou seja, o valor de cada medida da raiz de cada semente germinada foi homogênea em relação ao valor médio. Analisando cada concentração individualmente. Como a maioria dos C foi homogêneo o ensaio é validado estatisticamente.

Para tanto foi realizado um teste de *tukey* nesses tratamentos, que é um teste comparativo. Na C2, as concentrações 25, 50 e 100, foram diferentes do controle e foram diferentes entre si.

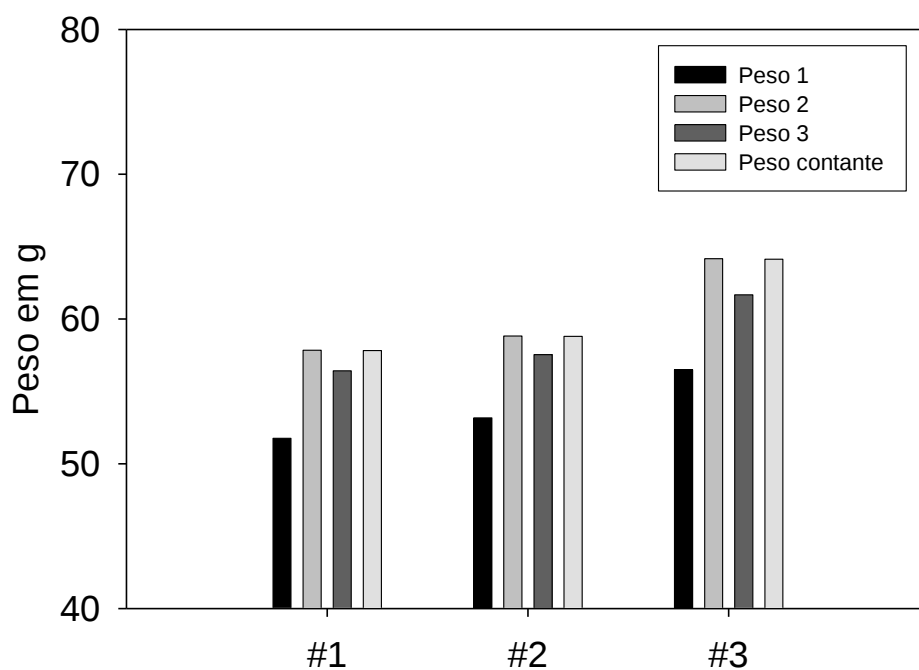
Mesmo para a concentração mais baixa (6,25%), ainda há diferença significativa do crescimento da radícula comparada ao controle. Observa-se que nas concentrações de 25 e 50% as radículas apresentaram maior comprimento quando comparado com o crescimento nas demais concentrações. Na comparação entre as concentrações 25 e 50%, não houve diferença significativa, indicando que a concentração de 25% apresenta resultados similares em termos de crescimento vegetal que a concentração de 50%.

Com base no teste, pode-se observar que o uso do lixiviado do lodo, dissolvido em água numa concentração de 1:4, possui um efeito promotor de crescimento nos vegetais muito superior ao tratamento do controle. Essa concentração de 1:4, da concentração 25% é melhor que 1:2, da concentração 50%, devido a possibilidade de menor uso de material e resultar em um mesmo efeito de crescimento e desenvolvimento das sementes. Foi constatado que mesmo na menor concentração (6,25%), que em proporção representaria 1:16, o resultado de crescimento demonstrou ser melhor que no controle.

3.4. Sólidos totais, fixos e voláteis

Seguindo a metodologia proposta para as pesagens, a amostra saiu da mufla e em seguida aferiu-se o peso, que foi repetido por quatro vezes até manter o peso em padrão constante. Após o peso manter-se constante, as capsulas seguiram pra mufla e então pesado o peso 3 (P3) g conforme demonstrado no gráfico abaixo.

Figura 5 - Pesos 1, 2, 3 e peso constante para cálculo de Sólidos Totais, Fixos e Voláteis.

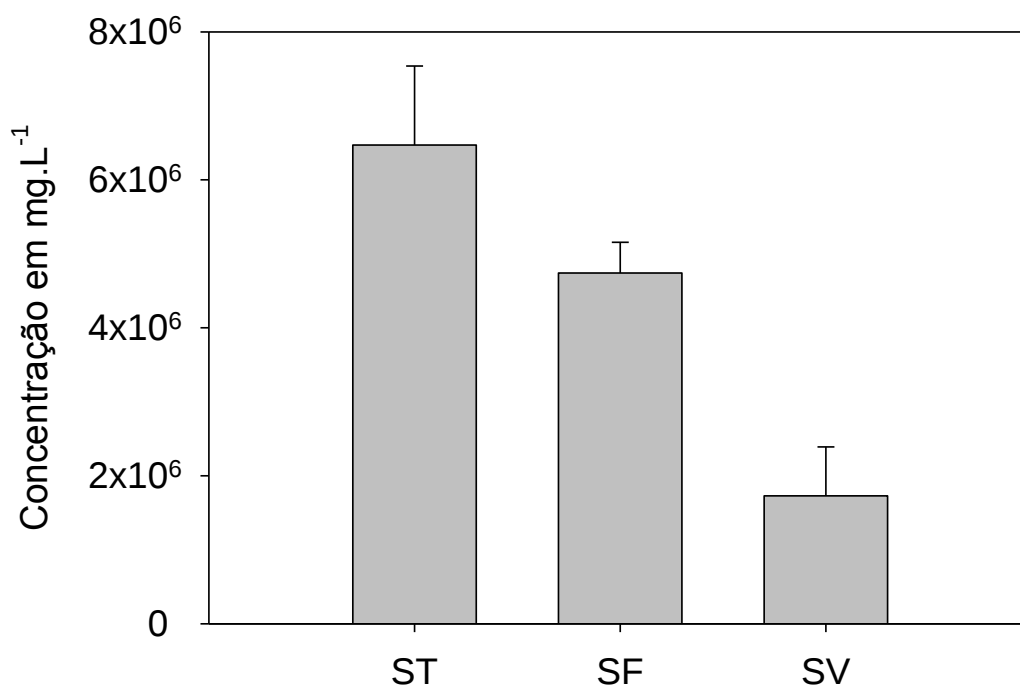


Fonte: Autor.

Os pesos 1, 2, 3 e o peso constante (Figura 5) da réplica 1 e 2 apresentam valores muito próximos, enquanto a réplica 3 apresenta maiores valores, se comparado aos demais.

Os valores calculados para os sólidos totais, sólidos fixos e sólidos voláteis, apresentam semelhança nas réplicas 1 e 2, enquanto a réplica 3 apresentou valores acima das demais para todos os tipos de sólidos.

Figura 6 – Valores médios e seus respectivos desvios, dos resultados das análises dos sólidos totais, fixos e voláteis.



Fonte: Autor.

Já a relação calculada entre sólidos voláteis e sólidos totais demonstra que a réplica 3 (0,32) apresentou razões maiores que as réplicas 1 (0,23) e 2 (0,23). A relação encontrada entre os valores de sólidos voláteis e sólidos totais é inferior a 0,70 para as três réplicas da amostra composta, com o valor médio da amostra composta de $0,26 \pm 0,05$, demonstrando estabilidade do material amostrado, conforme preconiza a Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2016).

3.5. Potencial agronômico

A caracterização do potencial agronômico considerou as médias das concentrações dos macro nutrientes nas três réplicas da amostra composta conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Concentração média e desvios padrão, dos macro nutrientes expressos em mg.Kg⁻¹, detectados na amostra composta (Iodo12).

Elemento	Média ± Desvio padrão
----------	-----------------------

Carbono orgânico total	9,26 ± 0,88
Fósforo	626,52 ± 83,65
Nitrogênio nitrato	3,57 ± 0,74
Nitrogênio nitrito	0,04 ± 0,00
Nitrogênio amoniacal	552,53 ± 114,02
Nitrogênio total	596,67 ± 135,51

Fonte: Autor.

Nos resultados para os parâmetros de nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e carbono orgânico, a concentração da réplica #3 expressa um valor muito superior às demais réplicas. O nitrogênio na forma de nitrato, apresentou valores mais elevados na réplica #1, enquanto que o Fósforo apresentou maior valor na réplica #2. Da mesma forma que nas análises dos metais, estas discrepâncias entre as réplicas não expressa um valor de concentração destes elementos que configure um potencial impacto ou poluição.

O Carbono total apresentou valor médio de $9,26 \pm 0,88 \text{ mg.Kg}^{-1}$, representando um elemento importante para a agregação das partículas, porosidade, densidade, na capacidade de retenção, infiltração de água e aeração do solo. A concentração do Fósforo, parâmetro que pode ter muita variação dependendo do lodo analisado, apresentou concentração média de $626,52 \pm 83,65 \text{ mg.Kg}^{-1}$.

O Nitrato, parâmetro que possui baixa retenção no solo e pode ser facilmente lixiviado se não absorvido pelas plantas (BETIOL & CAMARGO, 2006), apresentou concentração média de $3,57 \pm 0,74 \text{ mg.Kg}^{-1}$, enquanto que o Nitrito permaneceu em $0,04 \text{ mg.Kg}^{-1}$. A decomposição converte Nitrogênio em Nitrito e depois em Nitrato, sendo observado que em altos teores de Nitratos há baixo teor de amônia, indicando que há decomposição antiga.

O Nitrogênio Amoniacal, que é facilmente retido nos coloides do solo e considerado indicador de poluição recente, apresentou concentração alta comparado aos demais parâmetros, com média de $552,53 \pm 114,02 \text{ mg.Kg}^{-1}$. A concentração de Nitrogênio Total apresentou altos valores, comparadas as demais formas de Nitrogênio, com média de $596,67 \pm 135,51 \text{ mg.Kg}^{-1}$. O Nitrogênio Kjeldahl ou total é a soma do Nitrogênio orgânico mais o Nitrogênio Amoniacal, desse modo, o Nitrogênio orgânico apresentou $44,12 \text{ mg.Kg}^{-1}$.

Em geral o lodo de esgoto apresenta 40% de matéria orgânica, 4% de Nitrogênio, 2% de Fósforo e demais micro e macro nutrientes, além de elementos potencialmente tóxicos (BETIOL & CAMARGO, 2006).

4 DISCUSSÃO

O lodo de esgoto consiste em um material biogênico com elevado teor de matéria orgânica, que produz um aumento na retenção de umidade em solos arenosos e melhora a permeabilidade e a infiltração nos solos argilosos e, por determinado tempo, mantém uma boa estrutura e estabilidade dos agregados do solo na superfície (BETTIOL & CAMARGO, 2000). A influência da aplicação do lodo de esgoto sobre solos promovem a agregação de partículas e determinam aumento no volume do solo, causando redução na sua densidade, devido a presença de matéria orgânica e cátions presentes (Ca^{2+} e Al^{3+} , dentre outros).

Os cátions atraídos pelas cargas negativas da matéria orgânica mantêm em equilíbrio as concentrações dos mesmos no solo. À medida que os cátions da solução são retirados, por lixiviação ou absorção das raízes, novos cátions são liberados para a solução pela matéria orgânica, estabelecendo-se, assim, novo estado de equilíbrio. A matéria orgânica exerce de fato um efeito tampão, evitando bruscas variações da disponibilidade de nutrientes. A aplicação de lodo de esgoto pode promover a restauração das propriedades do solo de modo mais rápido do que os processos ecossistêmicos naturais ao longo do tempo (GODOI, 2008; ANDREOLI, 2001; SAMPAIO *et al.*, 2016).

4.1. Caracterização do lodo de esgoto

De todos os metais (elementos químicos) analisados, nenhum excedeu o limite de concentração permitido pelo CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006) e pela IN 07 (MAPA, 2016), portando segundo as legislações consultadas, a aplicação do lodo de esgoto pode ser dar para diversas finalidades dentre as quais na agricultura. Quando comparada com a legislação da Comunidade Européia (86/278/EEC) que define limites de 7 metais no lodo de esgoto para uso agrícola, novamente, nenhum parâmetro excedeu os limites estabelecidos.

Sampaio *et al.* (2016) avaliaram o potencial de absorção e mobilização de metais no perfil do solo da Mata Atlântica no primeiro ano após a aplicação de lodo de esgoto mostrando que podem ser utilizados de maneira ambientalmente segura sem que os

metais se tornem biodisponíveis. O autor afirma que o material pode ser usado na recuperação da Mata Atlântica em solos arenosos degradados, com pouco impacto no acúmulo de solo e absorção de metais traço pelas árvores. Entretanto, em concentração mais elevada àquela que as plantas suportam, podem colocar em risco toda a produtividade de determinada cultura e da qualidade do solo, contaminando o ecossistema como um todo.

A origem do alumínio no lodo, deriva dos coagulantes a base de alumínio que são aplicados para formar coloides e remover compostos de Fósforo no tratamento de efluentes (KLUCZKA *et al.*, 2017). A concentração do elemento encontrada na caracterização foi de 2,34 g.Kg⁻¹, superior comparado a literatura com 12,18 mg.Kg⁻¹ (FRANÇA *et al.*, 2011). O efeito nocivo dos níveis tóxicos de alumínio é a redução no crescimento radicular de plantas sensíveis, o que impede a planta de obter água e nutrientes em profundidade pelo seu enraizamento superficial.

Comparando os resultados encontrados para o Arsênio (abaixo de 0,001 mg.Kg⁻¹), o valor médio foi muito inferior a legislação CONAMA 375 (41 mg.Kg⁻¹), IN 7 (20 mg.Kg⁻¹), e demais estudos realizados no Brasil como por exemplo França *et al.* (2011) obtiveram o resultado de 3,3 mg.Kg⁻¹. As maiores fontes de Bário são de origem antropogênicas por meio de emissões industriais, atividades de mineração, refino ou processamento de minérios ou manufatura de produtos contendo Bário (GUERRA & ANGELIS, 2007); os valores encontrados no lodo caracterizado (47,02 ± 314,61 mg.Kg⁻¹) são mais de duas vezes inferiores aos consultados na literatura que variaram de 116 a 650 mg.Kg⁻¹ (ZANATTA, 2014; FRANÇA *et al.*, 2011; ABREU *et al.*, 2019).

O Cádmio é um dos elementos que mais oferece riscos para a saúde humana, podendo se acumular em organismos aquáticos, possibilitando sua entrada na cadeia alimentar causando disfunção renal, hipertensão, aterosclerose, inibição no crescimento, doenças crônicas em idosos e câncer, sendo um metal desnecessário ao metabolismo vegetal e animal (SCALIZE, 2003). O valor de Cádmio (0,44 ± 0,01 mg.Kg⁻¹) apresentado neste estudo foi muito próximo dos resultados obtidos por Zanatta (2014), com 0,4 mg.Kg⁻¹ e França *et al.* (2011) com 0,6 mg.Kg⁻¹. Godoi (2008) observou tendência de redução nos níveis deste elemento no solo indicando, um papel imobilizador do lodo de esgoto e aponta para a retenção de íons de Cádmio, evitando o risco imediato de contaminação de plantas e mananciais. Quanto ao Chumbo, a presença pode ser preocupante por ser um metal que pode afetar quase todos os órgãos e sistemas do corpo humano e determinadas concentrações desse elemento no ambiente pode ser letal para os peixes (CETESB, 2009). Os valores consultados na

literatura (ZANATTA, 2014; ABREU et.al., 2019), são superiores ao encontrado neste estudo ($7,69 \pm 6,29 \text{ mg.Kg}^{-1}$).

O Cobre pode acarretar em irritação e corrosão da mucosa, danos capilares, problemas hepáticos e renais, e irritação do sistema nervoso central seguido de depressão, entretanto, a intoxicação além de muito rara e ocorre apenas em doses muito altas (SCALIZE, 2003). Comparando os valores de Cobre na literatura, França et al. (2011) apresentaram o resultado mais semelhante ao encontrado no presente estudo ($70,52 \pm 59,83 \text{ mg.Kg}^{-1}$) com $84,4 \text{ mg.Kg}^{-1}$; diferentemente de Zanatta (2014) que encontrou uma variação de 171 a 2.260 mg.Kg^{-1} . A absorção de Cobre pode ser inibida pelo maior teor de Zinco, o elemento tende a se acumular mais nas raízes do que nas folhas, indicando que há uma baixa translocação desse nutriente na planta (BETIOL & CARMARGO, 2006).

O valor médio de Cromo encontrado na caracterização ($22,37 \pm 15,49 \text{ mg.Kg}^{-1}$) é semelhante ao encontrado por outros estudos realizados em lodos de esgoto que variaram de 17,8 a 113 mg.Kg^{-1} (ZANATTA, 2014), $26,4 \text{ mg.Kg}^{-1}$ (FRANÇA et al., 2011), e 70 mg.Kg^{-1} (ABREU et al., 2019). O Cromo não pode ser considerado como uma fonte de contaminação do solo, não apresentando riscos ambientais e não tem tendência a lixiviação, segundo Godoi (2008).

O Ferro, um elemento catalisador que ajuda na formação da clorofila, age como um carreador de oxigênio e ajuda a formar certos sistemas respiratórios envolvendo enzimas (GODOI, 2008), apresentou concentração ($4,5 \text{ g.Kg}^{-1}$) quatro vezes superior ao encontrado no estudo por França et al. (2011), com 19.41 mg.Kg^{-1} . O Mercúrio ($<0,001 \text{ mg.Kg}^{-1}$) apresentou resultados inferiores da legislação CONAMA e MAPA (17 e 1 mg.Kg^{-1}), e comparando com a literatura consultada, os valores também ficaram abaixo dos encontrados por França et al., (2011) que encontrou $<1 \text{ mg.Kg}^{-1}$ e Abreu et al. (2019), que identificou $0,03 \text{ mg.Kg}^{-1}$.

Os níveis de Molibdênio no lodo de esgoto geralmente são baixos, entretanto quando em altas doses no solo podem resultar em toxicidade crônica (SCALIZE, 2003). O valor médio encontrado no estudo foi $0,03 \text{ mg.Kg}^{-1}$, inferior ao reportado na literatura que variou de 0,8 a $22,6 \text{ mg.Kg}^{-1}$ (FRANÇA et al., 2011; ZANATTA, 2014; ABREU et al., 2019).

O Níquel, derivado da queima de combustíveis fósseis, causador de reações alérgicas, que em doses elevadas causar dermatites nos indivíduos mais sensíveis e afetar nervos cardíacos e respiratórios. No solo, o teor varia em função da geologia local

elevada solubilidade, o que tende a limitar a sua ocorrência no lodo de esgoto (CETESB, 2009; SCALIZE, 2003; LOPES, 2015). Os valores de Níquel ($7,55 \pm 6,20 \text{ mg.Kg}^{-1}$) foram similares as concentrações observadas na literatura, variando entre 6,1 a 312 mg.Kg^{-1} (FRANÇA et al., 2011; ABREU et al., 2019; ZANATTA, 2014). O Selênio também teve concentração média ($0,44 \pm 0,01 \text{ mg.Kg}^{-1}$) inferior a legislação e literatura, França et al. (2011) e Abreu et al. (2019) apresentaram concentração do elemento entre 1,0 e $5,9 \text{ mg.Kg}^{-1}$, respectivamente.

Os valores de Zinco observado neste estudo variaram de $158,96 \pm 131,76 \text{ mg.Kg}^{-1}$, indicando níveis considerados muito baixo quando comparado com os valores apresentados pela literatura de 316 mg.Kg^{-1} a 4.649 mg.Kg^{-1} (FRANÇA et al., 2011; ZANATTA, 2014; ABREU et al., 2019). O Zinco é um elemento essencial para o ser humano, animais e plantas, do qual muitos solos brasileiros são pobres, se tornando prejudicial somente em concentrações muito altas, sendo o elemento que apresenta maior potencial de lixiviação em solo (CETESB, 2009; GODOI, 2008; SCALIZE, 2003).

Com o aumento do tempo de interação do lodo de esgoto e solo, diminui-se a absorção dos metais pelas plantas, porque eles são fortemente retidos nos colóides do solo (FIZIOLA, SOUZA, GOMES, 2006; KLUCZKA et al., 2017; BETIOL & CAMARGO, 2006). Nascimento et al. (2014) observou em seu estudo níveis de Zinco superiores em plantas de girassol e no solo para os tratamentos com lodo de esgoto. As plantas apresentaram aumento de Zn, Cu e Mn e queda de Pb, com o acréscimo da quantidade de lodo de esgoto aplicada.

O fator decisivo para o emprego do lodo são os metais, entretanto, vale salientar a possibilidade de utilização de espécies que absorvem metais, prevenindo o impacto desses elementos no ambiente. As espécies: capixingui (*Croton floribundus* Spreng), aroeira-pimenteria (*Schinus terebinthifolius* Raddi), canafístula (*Peltophorum dubium* Spreng), cedro-rosa (*Cedrela fissilis* Vell.), mutamba (*Guazuma ulmifolia* Lam) e angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* Benth.), copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf.), jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) e jequitibá (*Cariniana estrellensis* Raddi), não apresentaram efeito significativo sobre as concentrações de metais no solo com a aplicação de lodo de esgoto, corroborando assim a possibilidade de uso (COELHO et al., 2019; SAMPAIO et al., 2016).

É evidente que os compostos metálicos presentes na amostra do lodo 12 possuem baixas concentrações se comparadas aos limites máximos admissíveis dos parâmetros regulatórios dispostos na legislação de comparação (BRASIL, 2006;

BRASIL, 2016), fator que contribui positivamente para o reaproveitamento do lodo de esgoto armazenado.

4.2. Parâmetros microbiológicos

No lodo de esgoto podem ser encontrados microorganismos saprófitos, comensais, simbioses ou parasitos, e apenas a última categoria é responsável por causar doença no homem e nos animais (GODOI, 2008). Dos organismos patogênicos, cinco grupos podem estar presentes no lodo de esgoto: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. O solo representa um meio inóspito para a maioria dos microorganismos existente no lodo de esgoto, em decorrência da intensa atividade microbiológica de organismos mais adaptados ao meio pedológico, fato que explica o curto período de sobrevivência no solo maioria dos patógenos após a incorporação do lodo de esgoto. Ovos de helmintos são exceção a esta regra por possuírem, no seu ciclo biológico há uma fase de sobrevivência obrigatória no solo, sendo este um dos principais organismos indicadores das características do lodo de esgoto. Contudo, são sensíveis aos raios solares, que incidindo diretamente produzem sua dessecação, reduzindo seu tempo de sobrevivência (SANEPAR, 1999; GODOI, 2008).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 375 de 2006, o lodo de esgoto não pode ser utilizado na fertilização do solo de pastagens, tubérculos, olerícolas, culturas inundadas e de raízes, assim como todas as outras culturas que possuam contato de sua parte comestível com o solo. A mesma legislação definiu que o lodo Classe A apresenta maior segurança para aplicação na agricultura por serem mais restritivos em relação à concentração de patógenos, enquanto que o de classe B não pode ser utilizado na agricultura. A amostra de lodo de esgoto apresentou densidades inferiores aos limites regulatório oficiais (BRASIL, 2006; BRASIL, 2016) para coliformes termotolerantes (10^3 NMP.g⁻¹ de ST) e ovos viáveis de helmintos (0,25 ovo.g⁻¹ de ST) e também ausência de *Salmonella sp* (10 g de ST) e a densidade de vírus foi inferior a 0,25 UFP, enquadrando o lodo de esgoto como Classe A. Considera-se que o acondicionamento do lodo em *bags*, influencia na redução da presença de patógenos (FRANÇA, 2010).

Faria (2015) avaliou o tempo de persistência de ovos viáveis de patógenos em solo cultivado com *Eucalyptus* e fertilizado com lodo de esgoto, e estimou que os tempos médios para a sobrevivência de coliformes termotolerantes foram 54 a 93 semanas. Para enterovírus os resultados foram negativos desde o início do experimento,

afirmando que a taxa de sobrevivência deste tipo de microrganismo decai rapidamente logo nas primeiras horas após a aplicação do lodo de esgoto no solo, enquanto que para *Ascaris* spp. o tempo médio para a viabilidade de ovos de foi de 8,5 semanas.

Vale salientar que a contagem “zero” não garante que o lodo de esgoto esteja completamente livre de ovos de helmintos, tendo em vista que nenhuma das metodologias de enumeração garante um percentual de recuperação de 100% dos ovos eventualmente presentes nas amostras processadas. Outro fator importante a ser considerado diz respeito à própria coleta de amostras, pois a distribuição dos ovos pode se tornar muito heterogênea ao longo do perfil sedimentar. Cabe destacar ainda a necessidade de realizar estudos relacionando e abrangendo as realidades climáticas das diversas regiões do Brasil, uma vez que o clima se mostra um fator determinante na persistência de organismos patogênicos no lodo de esgoto (FRANÇA, 2010; FARIA, 2015).

Sampaio (2013) afirma que não encontra razão para o estabelecimento das restrições para o uso de lodo de esgoto Classe A, conforme a Conama 357 (Brasil, 2006), muito menos qualquer estudo técnico-científico que as justifiquem. Ressalta-se ainda, que a regulamentação brasileira estabelece, ao contrário das legislações do Reino Unido e EUA, a proibição de aplicação de lodo de esgoto classe B em culturas alimentícias e pastagens, denominando a proibição e os limites brasileiros como extremamente conservadores e restritiva em função das suas condições climáticas favoráveis.

4.3. Ensaio de germinação

Entre os testes de toxicidade destaca-se o de germinação e alongamento de raiz por ser um teste simples, rápido, de baixo custo e que possibilita avaliação dos efeitos causados por diversos compostos (DA MATTA E UMBUZEIRO, 2014). O lodo de esgoto usado não apresentou efeitos inibitórios na germinação e crescimento das raízes. No experimento, as sementes de alface foram capazes de se desenvolver na presença do solubilizado em todas as concentrações, não apenas no controle positivo, permitindo germinação e crescimento radicular.

Os melhores resultados da média de germinação, maior que o controle, foi na concentração 6,25% do solubilizado. Muito embora, o maior crescimento de raiz e índice

de germinação foi encontrado na concentração de 50% e 25% respectivamente. Esse comportamento de crescimento de raiz, possivelmente, se deve à absorção de nutrientes pela *Lactuca sativa*, presente no lodo de esgoto.

O incremento de crescimento, no ensaio de germinação, corroboram com as concentrações de nutrientes encontradas (N: $596,67 \pm 135,51$; P: $626,52 \pm 83,65$, Cu: $70,52 \pm 59,83$; Fe: $4.510,47 \pm 880,43$; e Zn: $158,96 \pm 131,76$) que possivelmente favorecem a produtividade primária vegetal, demonstrando que o uso do lodo para fins agrícolas atua como fertilizante, incorporando nutrientes ao solo (SILVA et al., 2010; AFÁZ, 2017; ABREU et al., 2019). Resultados semelhantes foram encontrados por Zanata (2014) que o efeito estimulante de crescimento da raiz, para a semente de *Lactuca sativa* apresentou alongamento relativo da raiz, índice de germinação, crescimento em 100% do estrato de lodo de esgoto e crescimento maior que o controle nas concentrações 0,1; 0,5 e 1,0%, esse comportamento, possivelmente, se deve à absorção de nutrientes pela *Lactuca sativa*, presente no lodo de esgoto.

O maior percentual de germinação (concentração 6,25%, com 96,36% de sementes germinada) e comprimento da radícula (concentrações de 50% com $38,55 \pm 2,83$ mm, seguido pela concentração de 25% com $33,65 \pm 0,67$ mm) são resultados semelhantes aos encontrados por Polleti et al (2017), o qual afirma que a utilização de uma baixa dose de lodo de esgoto pode estimular o crescimento de raízes e o aumento da dose de lodo aplicado mostrou-se menos eficiente no crescimento de raízes da Alface. Altas concentrações de lodo tiveram um impacto na germinação das sementes e esse efeito negativo foi sendo reduzido à medida que o lodo estabilizava no solo, em que estabilização do lodo pode diminuir os compostos tóxicos presentes ou sua biodisponibilidade para as sementes testadas.

Analisando o índice de germinação - IG, todas amostras são superiores a 100%. Tiquia et al. (1996) explicam que o IG é um índice muito sensível relacionado a fitotoxicidade, relacionando assim a ausência da toxicidade em IG superiores a 80%, conforme resultados apresentados no estudo, os quais foram todos superiores. Embora o ensaio de germinação não seja suficiente para caracterizar o lodo de esgoto a partir da presença de metais, o aumento da dose de lodo de esgoto aplicado mostrou-se menos eficiente no crescimento de raízes do Alface e a utilização de uma baixa dose de lodo de esgoto pode estimular o crescimento de raízes para as sementes de Alface, como demonstrou Polleti et al. (2017).

4.4. Sólidos totais, fixos e voláteis

Os sólidos totais e sólidos voláteis são parâmetros utilizados para monitorar o grau de estabilização da matéria orgânica e consequentemente determinam o teor de putrefação do lodo que consequentemente está relacionado a sua capacidade de produzir odores ofensivos e atrair vetores transmissores de doença, como ratos, aves e insetos. O aparecimento de vetores em locais de aplicação e estocagem do lodo de esgoto podem ser avaliadas pelos sólidos fixos (teor de cinzas) do lodo e a digestão do mesmo pelos sólidos voláteis (FREDDO, 2014). Todas as réplicas, estiveram abaixo do limite regulatório definido pela Resolução CONAMA 375 (SV/ST <0,7), demonstrando assim estabilidade do material amostrado e sua conformidade com as exigências legais para uso agrícola. Esse resultado pode demonstrar estabilização da matéria orgânica no lodo, principalmente porque o material estava acondicionado em “bags” por um período maior que 12 meses. Caso semelhante foi descrito por Zanatta (2014) em umas das amostras que estava acondicionada nas mesmas condições por 4 meses apresentou valor semelhante ao encontrado no estudo (aproximadamente 0,70).

4.5. Potencial agronômico

A utilização agrícola do lodo de esgoto tem vantagens em solos tropicais, devido aos benefícios da incorporação dos nutrientes gerando aumento da produtividade agrícola, resultando em efeitos sociais positivos na região de atividade (FRANÇA, 2010; ANDREOLI, 2001). Garcia et al. (2009) comparou o lodo de esgoto com outras fontes orgânicas, como dejetos de aves e bovinos, vinhaça e composto de lixo urbano, e observou que o lodo de esgoto possui níveis elevados de Nitrogênio e Fósforo, sendo inferior apenas ao do esterco bovino.

Os estudos mostram que quanto maior a taxa de estabilização, maior a concentração de Carbono orgânico nos lodos de esgoto. A adição de lodo de esgoto também contribui para aumentar as taxas de infiltração e reduções das perdas de água e de solo pela drenagem superficial. O valor inferior de Carbono orgânico ($9,26 \pm 0,88 \text{ mg.Kg}^{-1}$) pode ser explicado em função do tratamento adotado ou não e o tempo que o lodo de esgoto permaneceu acondicionado. Mesmo o material analisado demonstrando estabilidade, o valor de Carbono orgânico apresentou-se inferior ao esperado, possivelmente estando relacionado ao tratamento adotado o que talvez explique a

proporção de dez vezes inferior ao que normalmente é relatado na literatura (FRANÇA et al., 2011; ZANATTA, 2014).

A importante presença de Carbono orgânico está diretamente ligado ao teor de matéria orgânica no material que geralmente leva a estabilidade de agregados, incrementa a capacidade de retenção de água, diminui a densidade, aumenta a estrutura, aeração, tamponamento e correção do pH do solo, além de melhorar a fauna e flora, aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC) e adsorção de nutrientes, aumentar a fertilidade, contribuir para a ciclagem de nutrientes essenciais no desenvolvimento de vegetais, demandando uma menor quantidade de insumos (ABREU et al., 2019; FIZIOLA, SOUZA, GOMES, 2006; FREDDO, 2014).

O Fósforo pode ser fruto da dissolução do solo ou originar-se a partir da decomposição da matéria orgânica do próprio esgoto (matéria orgânica ou inorgânica, dissolvida ou particulada) e da matéria orgânica constituinte da biomassa gerada nos processos de tratamento. Um dos nutrientes mais demandado pelas plantas, juntamente com Nitrogênio e potássio, a maior ocorrência de Fósforo no lodo de esgoto está relacionada a sua baixa difusão e alta fixação nas partículas constituintes do lodo (CORRÊA, 2007; LOPES, 2015).

O Fósforo representa aquele cuja reciclagem assume importância destacada, tendo em vista representar cerca de 1% do dispêndio atual mundial em matéria prima e pelo fato de sua obtenção ser restrita exclusivamente à exploração de jazidas de rochas fosfáticas. O resultado médio encontrado 626,52 mg.Kg⁻¹ foi inferior apresentado na literatura 3,7 g.Kg⁻¹ (França et al., 2011), embora reconheça-se que o conteúdo de Fósforo no lodo de esgoto sanitário pode variar consideravelmente entre ETEs, em função do tipo de tratamento utilizado e das características qualitativas do esgoto afluente (SAMPAIO, 2016, ZANATTA, 2014; FRANÇA et al., 2011).

Na decomposição do lodo de esgoto, os ácidos orgânicos liberados pela matéria orgânica em decomposição podem bloquear a absorção do Fósforo, diminuindo a fixação no solo, esse mecanismo de bloqueio aumenta a disponibilidade de Fósforo para as plantas (MUNHOZ & BERTON, 2006). É praticamente nulo o risco do excesso desse elemento em solos tropicais devido a natural deficiência que costuma reterendo-o e baixa mobilidade no perfil do solo, contudo, se houver arraste de material sólido superficial para corpos de água pode provocar eutrofização (BETIOL & CAMARGO, 2006, GODOI, 2008; FREDDO, 2014).

O Nitrogênio Amoniacal demonstra efeito promotor na absorção de Fósforo porque provoca redução do pH na interface solo-raiz. Ao contrário do Nitrogênio, o Fósforo deve ser aplicado de uma só vez para redução de custos e em quantidades maiores que as demandadas pelas plantas, pois grande parte irá primeiramente suprir as reações do substrato e não será usada pela vegetação. As plantas necessitam de pelo menos cinco partes de Nitrogênio para cada parte de Fósforo (MUNHOZ & BERTON, 2006; CORRÊA, 2007).

O Nitrogênio é um nutriente essencial para o desenvolvimento da planta e estimulador de crescimento, demandado nas fases iniciais de desenvolvimento. Apesar de sua alta disponibilidade, grande preocupação vem sendo dada à sua reciclagem, uma vez que a produção de fertilizantes nitrogenados sintetizados a partir do N₂ (atmosférico), exige grande dispêndio energético, consumindo 12,5 kWh para fixar 1 kg de Nitrogênio do ar (CORRÊA, 2007; SAMPAIO, 2013). As transformações e armazenamento do Nitrogênio no solo ocorrem por diversos processos como explicam Boeira & Maximiliano (2006), como mineralização, desnitrificação, volatilização, absorção pelas plantas, fixação pelos minerais de argila, retenção como cátion trocável, imobilização de Nitrogênio inorgânico na matéria orgânica do solo e imobilização microbiana.

A maior parte do Nitrogênio no lodo de esgoto está na forma orgânica que tem que ser mineralizada para tornar-se disponível para a planta. Durante o processo de decomposição do lodo de esgoto, o Nitrogênio orgânico pode ser convertido em Amônio ou Nitrato, dependendo das condições físicas e bioquímicas presentes (solos poucos aerados). A quantidade de Nitrogênio na forma de Nitrato ou amônio presente no lodo de esgoto é importante para o cálculo da estimativa do Nitrogênio disponível às plantas e evitar que o seu excesso seja lixiviado e acumule nos mananciais mais próximos podendo causar eutrofização (VIEIRA, MARICONI E VIEIRA, 2012; SILVA, 2012; BOEIRA et al., 2002).

Os valores encontrados para Nitrato apresentaram concentração média de 3,57 ± 0,74 mg.Kg⁻¹ e Nitrito 0,04 mg.Kg⁻¹, ambas foram inferiores a literatura que variaram de 17 mg.Kg⁻¹ de Nitrito e 5,3 g.Kg⁻¹ de Nitrato (ABREU et al., 2019); Nitrato/Nitrito apresentou variação de 27 a 64 mg.Kg⁻¹ (ZANATTA, 2014), Nitrato/Nitrito em 39,5 mg.Kg⁻¹ (FRANÇA, 2010). O Nitrato é uma das formas de Nitrogênio mais aproveitado pelas plantas, entretanto, quando a quantidade presente no solo excede a capacidade de absorção das raízes, há possibilidade de lixiviação no solo. O limite máximo tolerável para padrão de potabilidade de água é de 10 mg.L⁻¹ de Nitrato, adotado em vários países

e no Brasil, portanto as doses de lodo de esgoto aplicadas ao solo devem ser estabelecidas levando-se em conta as necessidades de Nitrogênio das plantas, evitando-se a geração de Nitrato em excesso (DYNIA, BOEIRA & SOUZA, 2006; BOEIRA & MAXIMILIANO, 2006).

Os resultados mostram um alto índice de Nitrogênio Amoniacal, possivelmente devido ao tipo de efluente que a lagoa recebe, associado ao tipo de processo empregado no tratamento deste tipo de rejeito. O resultado médio encontrado ($552,53 \text{ mg.Kg}^{-1}$) foi considerado alto indicando possivelmente lodo de esgoto recente, ficando próximo a literatura apresentando valores entre 120 mg.Kg^{-1} a 990 mg.Kg^{-1} (ABREU et al., 2019; FRANÇA et al., 2011; ZANATTA, 2014). O resultado médio para Nitrogênio Total ou chamado de Kjeldahl ($44,12 \text{ mg.Kg}^{-1}$) foi inferior a literatura que variou de 1,2 a 14 g.Kg^{-1} (FRANÇA et al., 2011; ZANATTA, 2014).

O Nitrogênio Total Orgânico apresentou baixas concentrações (com média de $596,67 \pm 135,51 \text{ mg.Kg}^{-1}$) se comparadas a literatura consultada, que apresentou valores de 1,2 a $14,2 \text{ g.Kg}^{-1}$ (FRANÇA et al., 2011; ZANATTA, 2014). A maior parte do Nitrogênio presente em lodos de esgoto encontra-se na forma orgânica, de fácil degradação pelos microrganismos do solo (BOEIRA & MAXIMILIANO 2006), possibilitando rápida liberação do Nitrogênio mineral no solo.

O Nitrogênio disponível no formato de Nitrito, Nitrato e amônia representa em média 16% do Nitrogênio Total (Kjeldahl), fazendo com que o Nitrogênio presente no lodo de esgoto seja liberado lentamente para o sistema, o que pode ser favorável para a absorção pelas plantas florestais em comparação com o uso de fertilizantes químicos.

A razão Carbono/Nitrogênio (C:N) do lodo estudado foi em média $1:59 \text{ mg.kg}^{-1}$. A razão C:N no lodo tem uma função essencial para o metabolismo de desenvolvimento de microorganismos, que necessitam de Carbono como fonte de energia e Nitrogênio para a síntese de proteínas (ZANATTA, 2014). Esta razão geralmente é baixa no lodo de esgoto, variando em uma faixa entre 5:1 a 11:1 (TEIXEIRA, 2012), no entanto, neste estudo os valores foram extremamente baixos (1:59), devido aos elevados valores de Nitrogênio que possivelmente indicam um lodo de esgoto recente. Apesar de todos os benefícios já conhecidos da fertilização orgânica, suas características e seu manejo inadequado podem proporcionar desequilíbrios em solos. Os microrganismos decompositores da matéria orgânica necessitam de 30 partes de C para uma parte de N, em que 20 partes serão perdidas no processo via CO_2 e 10 partes irão compor a estrutura desses microrganismos (MORETTI, BERTONCINI, ABREU, 2015).

Embora uma das réplicas da amostra composta (lodo12) tenha sido muito abaixo das concentrações das demais réplicas, o lodo de esgoto foi classificado como Classe A. Se adotarmos uma postura com maior grau de precaução, ainda assim o uso agrícola restrito à cultura do café, a silvicultura e às culturas de fibras e óleos seriam opções para destinação deste tipo de resíduo. Outras opções para o tratamento sanitário do lodo de esgoto, para seu uso agrícola é a higienização com a mistura com calcário ou, a compostagem. Há possibilidade da diversificação dos usos do material como reuso industrial (fabricação de agregado leve, cimento, tijolos e cerâmica), conversão em recuperação de solos (em áreas degradadas e de mineração) e uso florestal.

O alto custo e os impactos ambientais decorrentes das opções de disposição, além da necessidade de disposição de quantidades cada vez maiores de lodo de esgotos, torna o material um substituto ideal e sustentável ao adubo mineral. A destinação florestal do material como substrato para a produção de mudas florestais demonstra ser uma alternativa viável, sendo o material usado como adubo para plantios de recomposição florestal ou condicionador de solos para recuperação de áreas degradadas, possibilitando maior atração do ponto de vista ambiental, visto que nessas atividades seriam realizadas em apenas uma ou duas aplicações, diferentemente do uso agrícola para culturas de ciclo curto, em que são realizadas aplicações sucessivas (ABREU et al., 2019). Neste sentido, o lodo de esgoto pode ser fonte economicamente vantajosa de matéria orgânica para a execução de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), visto que aspectos sanitários, que limitam o uso de lodos de esgoto na agricultura, não são impedimentos para o uso deles na recuperação de áreas degradadas pela mineração (CORRÊA, 2007). A vantagem econômica do uso do lodo em PRAD deve-se a sua grande disponibilidade nas estações de tratamento, em contrapartida as maiores dificuldades encontradas ao se utilizar lodos de esgotos em PRAD's relacionam-se a seu transporte, manuseio e aplicação, por causa do elevado teor de umidade que lodos de esgotos contêm (85 - 88%). O excesso de água encarece o transporte e o estado dificulta o manuseio, a aplicação e a incorporação desses materiais a solos e substratos (CORRÊA, 2007).

Corrêa & Bento (2010) avaliaram a qualidade edáfica de um substrato minerado que recebeu lodo de esgoto mostraram que a incorporação resultou em melhoria das qualidades química e biológica do substrato exposto pela mineração e não alteraram a qualidade física.

O uso do lodo de esgotos na fabricação de substrato vegetal é outra alternativa para disposição final, promovendo o aproveitamento de nutrientes e matéria orgânica,

presentes no lodo. As concentrações de metais pesados na amostra de lodo de esgoto do estudo não impõem restrições de uso desse lodo para a fabricação do substrato, uma vez que atendem aos padrões estabelecidos na legislação.

O lodo de esgoto produzido no Distrito Federal tem sido utilizado desde 1994 como fonte de matéria orgânica em trabalhos de revegetação de jazidas exploradas, onde o efeito químico mais acentuado foi a elevação de Fósforo disponível para teores 13 vezes superiores aos medidos no solo do Cerrado. Grobelak et al. (2017) estudou o potencial de criar cobertura vegetal em solo estéril por uma única aplicação de lodo de esgoto através do processo de fitostabilização. O experimento de campo foi realizado na área contaminada, perto de uma fundição de zinco com alta concentração de metais (cádmio, zinco, chumbo) e baixa fertilidade do solo. Com uma única aplicação de lodo de esgoto, verificou-se que o desenvolvimento significativo da cobertura vegetal após cinco anos. O conteúdo de cádmio, zinco e chumbo na biomassa vegetal foi muito menor em comparação com as plantas não tratadas.

O potencial agrônômico do uso do lodo de esgoto está no seu uso em culturas com alta demanda nutricional, como o cultivo de rosa (PAIXÃO FILHO et al., 2014), girassóis (LOBO & FILHO, 2006), e como fertilizante alternativo para o cultivo inicial de eucalipto (AFAZ et al., 2017). Trigueiro & Guerrini (2003) e Guedes et al. (2006) avaliaram a viabilidade do uso de lodo de esgoto como substrato para mudas de *Eucalyptus grandis*. Delarmelina et al. (2013) avaliaram a melhor proporção entre componentes para formação de substrato para mudas de *Sesbania virgata*, espécie utilizada em programas de recuperação de áreas degradadas. Os resultados indicaram que os tratamentos que continham lodo de esgoto em sua composição, proporcionaram os melhores resultados para as características morfológicas relacionadas com o crescimento das mudas

Florentino et al. (2019), avaliaram os efeitos a longo prazo da aplicação de lodo de esgoto em solos tropicais inférteis destinados a plantações de eucalipto, tendo em vista que um manejo silvicultural experimenta de ciclo mais longo de rotação de culturas em comparação com os ciclos agrícolas tradicionais. Os resultados mostraram que a matéria orgânica do solo, os principais macronutrientes (N e P) e a capacidade de troca catiônica, foi geralmente mais elevada nos solos tratados com lodo de esgoto, enquanto o teor potencialmente tóxico de elementos tendia a aumentar com o aumento das doses de lodo de esgoto. As concentrações de elementos potencialmente tóxicos estavam geralmente abaixo das concentrações de fundo natural do solo e dos valores de referência de qualidade.

A aplicação do lodo de esgoto no cultivo da cana de açúcar, como fertilizante e corretivo pra acidez, propicia um aumento de produtividade (SILVA et al., 2010) e incrementos nos teores de Carbono do solo (CHIBA et al., 2008), mesmo após ciclos anuais de cultivo. Em um estudo comparativo o lodo de esgoto demonstrou um melhor desenvolvimento de cultivos de algodão em relação à adubação com cinzas de madeira (SOFIATTI et al., 2007). Diante do exposto, os resultados permitem inferir que o lodo de esgoto avaliado está estabilizado e possui potencial agrônômico relevante, além de ser um material sem risco de contaminação por elementos inorgânicos e por microrganismos patogênicos. Apesar dos resultados indicarem concentrações em amostra dentro dos limites para a disposição no solo, sem riscos de contaminação do sistema solo, água, planta, homem, existem inúmeras alternativas de uso agrícola do material, que garantem maior segurança ao uso, não necessariamente sendo usado para espécies comestíveis.

4.6. Redução de cargas microbiológica

A utilização do lodo de esgoto não esterilizado, como adubo orgânico em culturas com ciclo de vida curto, cujas partes comestíveis tenham contato direto com o solo e que sejam consumidas *in natura*, apresenta risco para a saúde humana e animal. Para reduzir esse risco, o lodo de esgoto pode ser tratado com os processos de digestão anaeróbia, calagem ou compostagem, antes de ser utilizado, garantindo maior segurança no processo (GODOI, 2008).

Uma das abordagens de estabilização mais comum e aplicada é a compostagem, que consiste na decomposição de materiais orgânicos que resulta em material de composição similar ao húmus do solo através da ação de microorganismos levando a fragmentação e oxidação gradual de detritos (GONZALEZ et al., 2019). É uma tecnologia ambientalmente amigável que reduz o volume de lodo e os custos de transporte, decompondo a matéria orgânica em um produto final estável sem compostos fétidos, patógenos e ervas daninhas, com o objetivo de obter um produto biológico estável que pode ser usado como adubo. Uma das vantagens da compostagem está na remoção de ovos de helmintos, também remove organismos patogênicos e parasitas, além de contribuir com a diminuição a disponibilidade de metais pesados, reduzindo seu risco de bioacumulação e de lixiviação (CORREIA, 2007).

Para que o processo ocorra é necessário que haja microorganismos e um fator que afete a atividade microbiológica, sendo eles: aeração, temperatura, teor de

umidade, teor de nutrientes e relação C/N. Leite & Paganini (2018) explicam que a primeira etapa do processo, denominada de biodegradação ativa, também chamada de bioestabilização ou decomposição ativa, onde há intensa atividade dos microrganismos que decompõem a matéria orgânica, consumindo muito oxigênio. Na fase seguinte, maturação, diminui-se a atividade microbiológica, reduzindo os requisitos de aeração, ocorrendo predominância de transformações de ordem química, ou seja, polimerização de moléculas orgânicas estáveis no processo conhecido como humificação. Deste modo, tem-se que a higienização ou inativação dos microrganismos patogênicos presentes no lodo está diretamente ligada à elevação da temperatura durante a oxidação e o tempo de exposição. Como resultado do processo, observa-se a produção de um composto estabilizado, isento de microrganismos patogênicos, de odor não agressivo e aspecto agradável, elevado teor de matéria orgânica humificada com grande aptidão agronômica, fornecendo nutrientes e minerais às plantas. A compostagem se destaca como meio economicamente e ambientalmente viável para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos e industriais para uso agrícola.

Outra maneira de se estabilizar lodos de esgotos consiste em deixá-los sob radiação solar, reduzindo a água e volume, excelente para agregar valor agronômico e econômico ao lodo de esgoto fresco, contudo ineficiente para a redução de patógenos. Em locais de clima quente e seco, a irradiação solar incidindo por uma semana é capaz de reduzir sua quantidade de água, diminuindo o volume original, em que a consequente concentração de sólidos na massa de lodo torna-o economicamente mais atrativo para ser transportado e utilizado. Outro efeito presenciado em lodos irradiados está no aumento da concentração de Nitrogênio mineral, por causa da mineralização da matéria orgânica do lodo durante o processo de irradiação (CORRÊA, 2007).

Já a estabilização e a higienização por meio da aplicação de cal (caleação) são feitas misturando-se Óxido de Cálcio ou Cal Virgem (CaO) ou Hidróxido De Cálcio ou Cal Hidratada (CaOH) ao lodo de esgoto, elevando o pH da mistura até que o ambiente se torne inapropriado à vida (pH acima de 11,5). Este processos produz, rapidamente, grande quantidade de gás amônia durante a mistura. Ao ser misturado a solos e substratos, o pH baixa para valores próximos a seis, havendo aceleração da mineralização da matéria orgânica do lodo de esgoto. Este método de esterilização, permanece questionável, pois ovos viáveis de helmintos têm sido recuperados em lodos caleados, além do fato de que a Cal Virgem e a Cal Hidratada são agressivos às plantas (SANTOS, 2020; CORRÊA, 2007).

Para uma economia circular, Santos *et al.* (2020) em Portugal destacam como alternativa sustentável o uso de resíduos como a casca de ovo nesse processo de higienização. O autor utilizou o método de secagem a 130° C e conseguiu desinfetar as amostras selecionadas abaixo do limite de *E. coli.*, todavia, o interessante foi o uso do CaO (obtido da casca do ovo) que levou a completa eliminação de *E. coli* em qualquer dosagem estudada. Dosagens de CaO foram testadas para avaliar a eficiência da remoção, usando quantidades menores e os resultados foram os mesmos, evidenciando assim a possibilidade de alternativas sustentáveis de desinfecção que são menos agressivas e que contribuem ainda para uma melhora ambiental na totalidade.

A amostra de lodo 12 apresentou uma baixa carga microbiana, possivelmente devido ao acondicionamento em *geobags*, indicando que esta tecnologia representa uma boa aliada na redução de patógenos. França (2010) encontrou resultados que indicaram que o processo de acondicionamento em *bags* remove as características parasitológicas do lodo, constatando ausência de ovos de helmintos viáveis, *salmonellas*, protozoários e coliformes termotolerantes <10³ NMP.g⁻¹.MS.

O material possui heterogeneidade dentro dos *geobags*, podendo apresentar variação dos parâmetros encontrados, devendo-se ter cautela quanto ao uso futuro e considerar as etapas de higienização.

5 CONCLUSÃO

Comparando os resultados obtidos da amostra composta de lodo de esgoto apresentaram conformidade aos limites regulatórios oficiais, com valores permissíveis de acordo com a legislação do CONAMA 375/2006 e pela legislação complementar IN 07/2016 do Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA.

Os resultados indicaram que todos os parâmetros analisados estão em conformidade com a exigência para lodo Classe A, sem que implique em riscos de contaminação do sistema solo, água e biota associada, entretanto, ressalta-se a possibilidade do material dentro dos *geobags* apresentar heterogeneidade. O lodo de esgoto avaliado estava estabilizado, além de possuir características físicas e químicas que indicam o potencial agronômico. Pode-se concluir que o material analisado apresenta potencial agronômico relevante, considerando os valores de Nitrogênio,

Fósforo e Carbono, somados com a baixa contaminação por elementos químicos inorgânicos (metais) e por microrganismos patogênicos.

A utilização agrícola do lodo permite que o material seja destinado de forma correta e ambientalmente amigável de acordo com as premissas ambientais, reduzindo a emissão de gases promotores de efeito estufa no sentido de transporte, disposição e decomposição da matéria orgânica, com incremento de aumentar a produtividade das plantas e aumenta contribuir assim para o resgate de Carbono atmosférico.

6 REFERÊNCIAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.007: Resíduos sólidos – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11269-2: Qualidade do solo — Determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre. Parte 2: Efeitos de substâncias químicas na emergência e no crescimento de vegetais superiores. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.005: Resíduos sólidos – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ABREU, Alan Henrique Marques de; ALONSO, Jorge Makhoulouta; MELO, Lucas Amaral de; LELES, Paulo Sérgio dos Santos; SANTOS, Gabriel Rocha dos. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia Raddi*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro (RJ), Brasil. Eng Sanit Ambient | v.24 n.3 | maio/jun 2019 | 591-599. DOI: 10.1590/S1413-41522019108265.

AFAZ, D. C. S.; BERTOLAZI, K. B.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol.12, num. 1, jan – fev, 2017, pp.112-123.

ANDREOLI, Cleverson Vitorino. Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final. Rio de Janeiro: RiMa ABES, 2001.

ANDREOLI, Cleverson Vitorino; FERREIRA, Andréia Cristina (Org.). Aproveitamento do Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Água e Esgotos Sanitários, Inclusive com

a Utilização de Técnicas Consorciadas com Resíduos Sólidos Urbanos. Curitiba: PROSAB, 2001. 257 p.

ANDREOLI, Cleverson Vítório; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. Lodo de Esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Editora FCO, 2001. 483 p.

APHA - *American Public Health Association*. AWWA - *American Water Works Association*. WEF- *Water Environment Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. Ed. Washington, D.C.: *Centennial Edition*, 2005.

BETTIOL, W; CAMARGO, O.A. Lodo de Esgoto: Impacto Ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto, São Paulo, Embrapa, 2000.

BIGHAM, J.M. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison, WI. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*. Book Series Nº 5, 1996.

BITTENCOURT, Simone; AISSE, Miguel Mansur; SERRAT, Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. Eng. Sanit. Ambient. vol.22 nº 6 Rio de Janeiro Nov./Dec. 2017. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017156260>.

BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. Dinâmica da mineralização de Nitrogênio de lodos de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. de. Lodo de esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 25-36.

BRASIL. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, SEMA, 2006.

BRASIL. Resolução nº 380, de 31 de outubro de 2006. Retifica a Resolução CONAMA no 375/06 – define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, SEMA, 2006.

BRASIL. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, SEMA, 2009.

BRASIL. Resolução nº 454, de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Brasília, SEMA, 2012.

BREMNER, J.M. In: Bigham, J.M. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Madison, WI. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Book Series N° 5.* 1996. p. 1085-1121.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. Boletim técnico no 106, Campinas, Instituto Agronômico, 1986.

CAMPAGNA, Aline Fernanda. Toxicidade dos sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho (São Carlos - SP). Dissertação de mestrado USP. Pirassununga, 2005.

CASTRO, Nathalia Paiva Barbosa de; ESCOBAR, Luiz Gustavo Burihan; MARTINS, Paula de Mello. O uso da tecnologia de tubos de geotêxtil para controle de erosão marinha e fluvial. Allonda Ambiental, São Paulo, 2008.

CASTRO, Nathalia. Sistemas tubulares para contenção de lodo e sedimentos contaminados. Tese de mestrado - ITA: São José dos Campos, 2005.

CESAR, Ricardo Gonçalves. Disposição de sedimentos de dragagem em solos tropicais: avaliação de risco ambiental com base em indicadores pedogeoquímicos e ecotoxicológicos. Niterói, 2014.

CHIBA, Marcio Koiti; MATTIAZZO, Maria Emília; OLIVEIRA, Fernando Carvalho. Cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto: II - Fertilidade do solo e nutrição da planta. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. 2008, vol.32, n.2, pp.653-662. ISSN 1806-9657. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200020>.

COELHO, Thamylla Rodrigues; SILVA, José Augusto Ferreira da; DIAS, Marcelo Vizeu. Lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) e compostagem orgânica em cultivo de mudas nativas: estudo na região dos lagos, RJ – Brasil. IFF, Macaé – RJ, 2019.

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina, ABBÀ, Alessandro, FRATTAROLA, Andrea, MIINO, Marco Carnevale, PADOVANI, Sergio, KATSOYIANNIS, Ioannis, TORRETTA, Vincenzo. *Legislation for the Reuse of Biosolids on Agricultural Land in Europe: Overview.* Sustainability, 2019; <https://doi.org/10.3390/su11216015>.

CORRÊA, Rodrigo Studart. Recuperação de áreas degradadas pela mineração no Cerrado, 2007. ISBN 8586591874, 9788586591877.

CORRÊA, Rorigo Studart; BENTO, Marcel Anderson Borges. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. R. Bras. Ci. Solo, 34:1435-1443, 2010.

COUNCIL, Directive 86/278/EEC de 12 Junho de 1986. *The protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture*. 1986.

DYNIA, J. F.; SOUZA, M. D. de; BOEIRA, R. C. Lixiviação de Nitrato em latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 855-862, maio 2006.

EMBRAPA. Manual de adubação e calagem para os estados de RS e SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS RS/SC): Porto Alegre, 2004.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997. ISBN 85-85864-03-6.

FARIA, Marianne Fidalgo. Avaliação da persistência de microrganismos patogênicos em solo cultivado com eucalipto e fertilizado com lodo de esgoto sanitário. Botucatu, 2015. 60p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agronomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

FENILI, L.H. Qualidade do sedimento do canal de navegação do Porto de Santos após dragagem de aprofundamento: ensaios ecotoxicológicos com *Tiburonella Viscana* e *Nitrokra Sp*. 2012. 110 p. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2012.

FILIZOLA, HF; SOUZA, M. D. de; GOMES, M. A. F. Amostragem de solos para análise de metais pesados. In: FILIZOLA, HF; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 37-47

FLORENTINO, Antonio Leite; FERRAZ, Alexandre de Vicente; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; ASENSIO, Verónica; MURAOKA, Takashi; DIAS, Carlos Tadeu dos Santos; NOGUEIRA, Thiago Assis Rodrigues; CAPRA, Gian Franco; ABREU-JUNIOR, Cassio Hamilton. *Long-term effects of residual sewage sludge application in*

tropical soils under Eucalyptus plantations, Journal of Cleaner Production, Volume 220, 2019, Pages 177-187, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.065>.

FRANÇA, Josué Tadeu Leite. Remoção de lodo de lagoa facultativa: avaliação quantitativa e qualitativa do lodo acumulado e seu acondicionamento em bag. Dissertação de mestrado UNICAMP: Campinas, 2010.

FRANÇA, Josué Tadeu Leite; STEFANUTTI, Ronaldo; CORAUCCI, Bruno Filho; ANARUMA, Francisco Filho; FRANÇA, Lizzi Lobo Leite; Remoção de Lodo de Lagoas de Estabilização e seu Acondicionamento em bag. Revista DAE, Janeiro/2011, <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.070>.

FREDDO, Alessandra. Caracterização físico-química de lodo proveniente de duas estações de tratamento de esgoto da região oeste do Paraná. Medianeira, 2014.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; BRAGANÇA, H. N. Características químicas de um solo degradado após aplicação de lodo de esgoto doméstico. Revista Verde, v.4, n.2, p.01-12,2009.

GODOI, Emiliano Lôbo de. Uso agrônômico de lodo de esgoto na recuperação de área degradada: efeito residual. Goiânia, 2008.

GONZÁLEZ, Daniel; GUERRA, Nagore; COLÓN, Joan; GABRIEL, David; PONSÁ, Sergio; SÁNCHEZ, Antoni. *Filling in sewage sludge biodrying gaps: Greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions*. *Bioresour Technol*; 291: 121857, 2019 Nov.

GRANDO, R. L.; ANTUNE, Adelaide Maria de Souza; FONSECA, Fabiana Valéria da; XAVIER, Antoni Sánchez Raquel Barrena. *Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80 p. 44–53 (2017). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii>

GROBELAK A., PLACEK A., GROSSER A., SINGH, Bal Ram, ALMÅS, ÅSGEIR R., NAPORA, A., KACPRZAK, M., *Effects of single sewage sludge application on soil phytoremediation*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 155, Part 1, 2017, Pages 189-197, ISSN 0959-6526.

GUEDES, Marcelino Carneiro; ANDRADE, Cristiano Alberto de; POGGIANI, Fábio; MATTIAZZO, Maria Emília. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em

função da aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 267-280, 2006. DOI: 10.1590/s0100-06832006000200008.

GUERRA, Ricardo Consiglieri, ANGELIS, Dejanira de Franceschi de. Avaliação da toxicidade do lodo gerado em reator biológico, durante o tratamento da água de produção, no terminal marítimo – Almirante Barroso, município de São Sebastião – SP. UNESP, Rio Claro, 2007.

HERMANNNS, Luciano. Estratégias ambientais para utilização de material de dragagem. UFRS: Porto Alegre, 2017.

IADC- *International Association of Dredging Companies and CEDA – Central Dredging Association. Environmental Aspects of Dredging*. ISBN 90-75254-05-9. Netherlands, 1997.

IHC. Royal IHC. Disponível em <https://www.royalihc.com>. Acesso em 24 de março de 2019.

JESUS, H.C; COSTA, E.A; MENDONCA, A.S.F; ZANDONADE, E. Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da Ilha de Vitória-ES. *Química Nova*, v. 27, n.3, p. 378-386, 2004.

KLUCZKA, J., ZOŁOTAJKIN, M., CIBA, M. STARON. *Assessment of aluminum bioavailability in alum sludge for agricultural utilization*. *Environ Monit Avalie* 189, 422 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6133-x>

KUO, S. In: Bigham, J.M. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison, WI. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*. Book Series Nº 5. 1996. p. 869-919.

LEITE, Thiago; PAGANINI, Wanderley da Silva. Compostagem de lodo de esgoto e produção de bio sólido: redução de patógenos e elementos potencialmente tóxicos. ISBN-13 (15) 978-85-88848-28-3. Doi <https://doi.org/10.11606/9788588848283>.

LI, Xiaowei; CHEN, Lubei; MEI, Qingqing, DONG, Bin. *Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China*. *Water research*, 2018. 142. 75-85. 10.1016/j.watres.2018.05.034.

LIMA, Lilian Rouse Silva. Dragagem, transporte e disposição final de sedimentos de leito de rio. Estudo de caso: calha do rio Tietê – Fase II. São Paulo, 2008.

LIU, H.-T., KONG, X.-J., ZHENG, G.-D., CHEN, C.-C; *Determination of greenhouse gas emission reductions from sewage sludge anaerobic digestion in China. Water Sci Technol* 8 January 2016; 73 (1): 137–143. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2015.472>

LOBO, Thomaz Figueiredo; FILHO, Helio Grassi. Níveis de lodo de esgoto na produtividade do girassol. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutricion Vegetal* 7(3):16-25. 2006. DOI: 10.4067/S0718-27912007000300002.

LOPES, Thiara Reis. Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbico e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes. UTFPR: Medianeira, 2015.

MACHADO, Luiz Carlos Pinheiro. Pastoreio Racional Voisin: tecnologia agroecológica para o terceiro milênio. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2004. 310 p.

MAPA. Decreto nº 4.954 de 2004. Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004.

MAPA. IN 07 de 12 de abril de 2016. Limites máximos de contaminantes admitidos em substrato para plantas. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.

MAPA. IN nº 25 de 23 de julho de 2009. Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

MAPA. Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, destinados à agricultura, e dá outras providências. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 1980.

MORETTI, Sarah Mello Leite; BERTONCINI, Edna Ivani; ABREU, Cassio Hamilton. Decomposição de Lodo de Esgoto e Composto de Lodo de Esgoto em Nitossolo Háplico. *R. Bras. Ci. Solo*, 39:1796-1805, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20150082.

MULVANEY, R.L. In. Bigham, J.M. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison, WI. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Book Series Nº5. 1996. p.1123-1200.

NASCIMENTO, A. L.; SAMPAIO, R. A.; ZUBA JUNIOR, G. R.; CARNEIRO, J. P.; FERNANDES, L. A.; RODRIGUES, M. N. Teores de metais pesados no solo e em girassol adubado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 18, n. 3, p. 294–300, 2014. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v18n03/v18n03a08.pdf>>.

NELSON, D.W. & SOMMERS, L.E. In: Bigham, J.M. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Madison, WI. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Book Series Nº 5. 1996. p. 961-1010.

OLIVEIRA, Regina C. B.; MARINS, Rozane V. Dinâmica de Metais-Traço em Solo e Ambiente Sedimentar Estuarino como um Fator Determinante no Aporte desses Contaminantes para o Ambiente Aquático: Revisão. *Revista virtual de química*, ISSN 1984-6835, 2011.

PAIXÃO FILHO, J. L. D.; GABRIELLI, G.; CORAUCCI FILHO, B.; TONETTI, A. L. *Use of stabilization pond sludge in cultivation of roses*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.18 nº 1, p. 85-89, 2014.

POLLETI, E. C. C.; SILVA, J. P. P.; AMORM, M. F.; PAIXÃO FILHO, J. L.; PIRES, M. S. G.. Análise de sensibilidade e de efeitos toxicológicos da aplicação de lodo de esgoto em sementes. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.8, n.2, p.130-137, 2017. DOI: <http://doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2017.002.0011>.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. 1987. *Análise Química do solo para fins de fertilidade*. Campinas, Fundação Cargill, 170p.

SAMPAIO, Américo de Oliveira. Afinal, Queremos ou não Viabilizar o Uso Agrícola do Lodo Produzido em Estações de Esgoto Sanitário? Uma Avaliação Crítica da Resolução CONAMA 375. *Revista DAE* nº 193. Ano 2013.

NORMA TÉCNICA INTERNA SABESP. SABESP NTS 013: Sólidos – Método de Ensaio – Revisão 1. São Paulo, 1999.

SANEPAR. *Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura*. SANEPAR, Curitiba, 1999.

SANTOS, Ailton Dias dos. *Estudo de possibilidade de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo*. Dissertação de mestrado: USP, 2003.

SANTOS, Andrei Feijó da Silva. Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano. FUNDACE: Ribeirão Preto, 2009.

SANTOS, Andreia F. SANTOS; Cátia P; MATOS, Ana M.; CARDOSO, Olga; QUINA, Margarida J.. *Effect of Thermal Drying and Chemical Treatments with Wastes on Microbiological Contamination Indicators in Sewage Sludge. Microorganisms*, 2020. DOI: 10.3390/microorganisms8030376. PMCID: PMC7142961.

SANTOS, Ednaldo Ramos. Caracterização química, microbiológica e toxicidade do lodo de esgoto da estação da Mangueira, Pernambuco, Brasil. Dissertação de mestrado. UCP: Recife, 2009.

SCALIZE, Paulo Sérgio. Disposição de resíduos gerados em estações de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto. São Carlos, 2003.

SILVA, F. C. da; BOARETTO, A. E.; ABREU JÚNIOR, C. H.; BERTON, R. S.; BASSO, L. C.; BARBIERI, V. Impactos da aplicação de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar e no ambiente. *HOLOS Environment*, v10 n1, 2010. ISSN 1519-8634.

SILVA, Noely Bochi. Avaliação química e ecotoxicológica de lodos e esgoto visando à utilização na agricultura. Campinas, SP: 2012.

SIMÃO, Mário Henrique. Sistematização dos aspectos ambientais de dragagens portuárias marítimas no Brasil. PUC/SP: São Paulo, 2009.

SOFIATTI, V.; LIMA, R. de L. S. de; GOLFARB, M.; BELTRÃO, N. E. de M. Cinza de madeira e lodo de esgoto como fonte de nutrientes para o crescimento do algodoeiro. *REVISTA DE BIOLOGIA E CIÊNCIAS DA TERRA* ISSN 1519-5228 Volume 7- Número 1 - 1º Semestre 2007.

TEIXEIRA, Camilo. Higienização de lodo de estação de tratamento de esgoto por compostagem termofílica para uso agrícola. Fpolis, 2012.

TIQUIA, S.M.; TAM, N.F.Y *Assessing toxicity of spent sawdust pig-litter' using seed germination technique. Resource Conservation Recycling*, 1994.

TIQUIA, S.M.; TAM, N.F.Y.; HODGKISS, I.J. *Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. Environmental Pollution*, v.93, 1996.

TRIBALLI, Rogério Carlos. Composição de amostra representativa de solo fertilizado com lodo de esgoto. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2008.

TRIGUEIRO, R. de M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrato para produção de mudas de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 64, p. 150- 162, 2003.

USEPA - United State Environment Protection Agency. SW-846. Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical Chemical Methods.1996.

USEPA. Ecological Effects Test Guidelines (OPPTS 850,4200): Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test. 1996.

USEPA. Unidet States Environmental Protection Agency. Standart for the use or diposal of sewage sludge. EPA 40-CFR Part 503. Washington, DC, USA, 1997.

VIEIRA, Rosana Faria; MARICONI, Waldemore; VIEIRA, Henrique Barros. Efeito Residual da Aplicação do Lodo de Esgoto em Milho (*Zea mays* L). XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. Águas de Lindóia, 2012.

ZANATTA, Maraline Conservani Klingohr. Caracterização da toxicidade de lodos de estação de Tratamento de esgoto com vistas a sua aplicação agrícola. Limeira, 2014.

7 ANEXOS

7.1. Anexo I - ARTIGO(S) SUBMETIDO(S)

Caracterização de lodo de esgoto dragado de lagoa de tratamento de efluentes e alternativas de disposição final.

RIBAS, Gisely de Sá; ALVES, Thiago Pereira; BRENTANO, Débora Monteiro; COSTÓDIO, Patrícia Fóes Scherer.

Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v54i0>.

Data de submissão: dia 27 de outubro de 2020.

RESUMO

Dragagem é uma técnica amplamente utilizada em diversas atividades que necessitam remobilizar sedimentos das mais diferentes origens. Os principais impactos ambientais da operação estão relacionados com a destinação deste tipo de resíduo. O estudo sobre a disposição dos sedimentos dragado de lagoas anaeróbias (lodo de esgoto), tem importância estratégica quanto ao reaproveitamento desta classe de resíduos sólidos. O lodo de esgoto apesar de potencialmente poder conter substâncias como metais pesados e organismos patogênicos, possui macro e micronutrientes com potencial de fertilização. Neste estudo buscou-se realizar a caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto doméstico desaguado em unidades “geobags” proveniente de quatro lagoas anaeróbias da estação de tratamento de esgoto. A caracterização do lodo de esgoto, demonstrou que todos os parâmetros estavam dentro dos limites preconizados pela legislação vigente, classificando-o como Classe A. Isto demonstra a possibilitando de disposição e reaproveitamento deste material, como por exemplo insumo agrícola. O potencial agronômico deste tipo de resíduo sólido permite que seja dada uma destinação ambientalmente adequada, promovendo redução da emissão de gases promotores de efeito estufa no sentido de transporte, disposição e decomposição da matéria orgânica, com incremento de aumento na produtividade das plantas, potencializando o resgate de carbono atmosférico.

Palavras-chave: Geobags. Sedimento. Biossólido.

Figura 7 - Comprovante de submissão do artigo a revista.

27/10/2020

Gmail - [DMA] Agradecimento pela submissão



Gisely de Sá Ribas <giselydesaribas@gmail.com>

[DMA] Agradecimento pela submissão

revistas_ojs@ufpr.br <revistas_ojs@ufpr.br>

27 de outubro de 2020 18:04

Responder a: José Milton Andriguetto Filho <revistamade@gmail.com>

Para: Srta Gisely de Sá Ribas <giselydesaribas@gmail.com>

Srta Gisely de Sá Ribas,

Agradecemos a submissão do trabalho "Caracterização de lodo de esgoto dragado de lagoa de tratamento de efluentes e alternativas de disposição final" para a revista Desenvolvimento e Meio Ambiente. Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão: <https://revistas.ufpr.br/made/author/submission/77547>

Login: giselydesaribas

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

José Milton Andriguetto Filho
Desenvolvimento e Meio Ambiente

Desenvolvimento e Meio

Ambiente

<https://revistas.ufpr.br/made>

7.2. Anexo II – RESULTADOS DESCRITIVOS

Figura 8 - Valores de concentração média, desvio padrão e limites regulatórios, para os metais analisados nas amostras expressos em mg.Kg^{-1} .

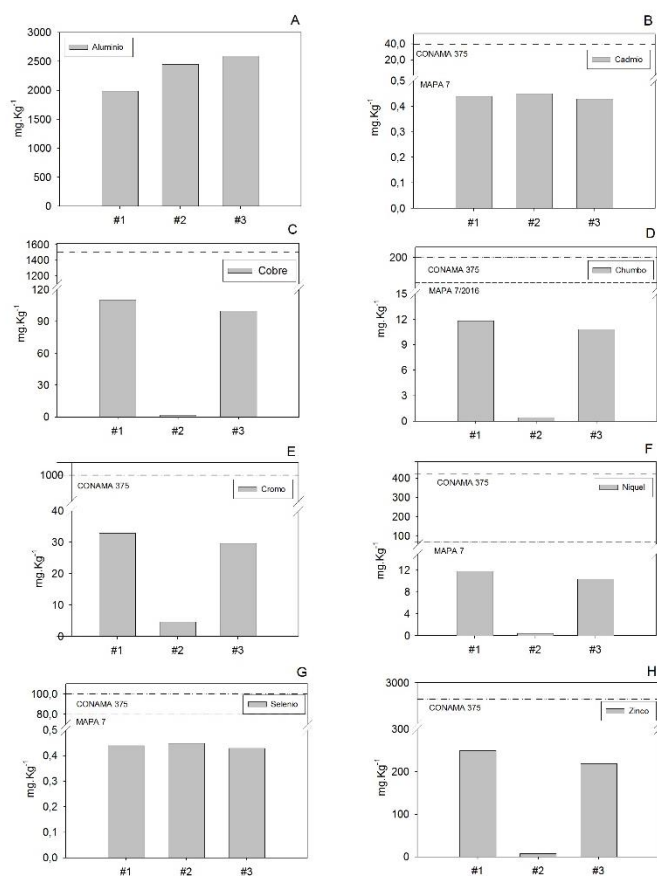


Figura 9 - Valores de concentração média, desvio padrão e limites regulatórios, para os metais analisados nas amostras expressos em mg.Kg^{-1} .

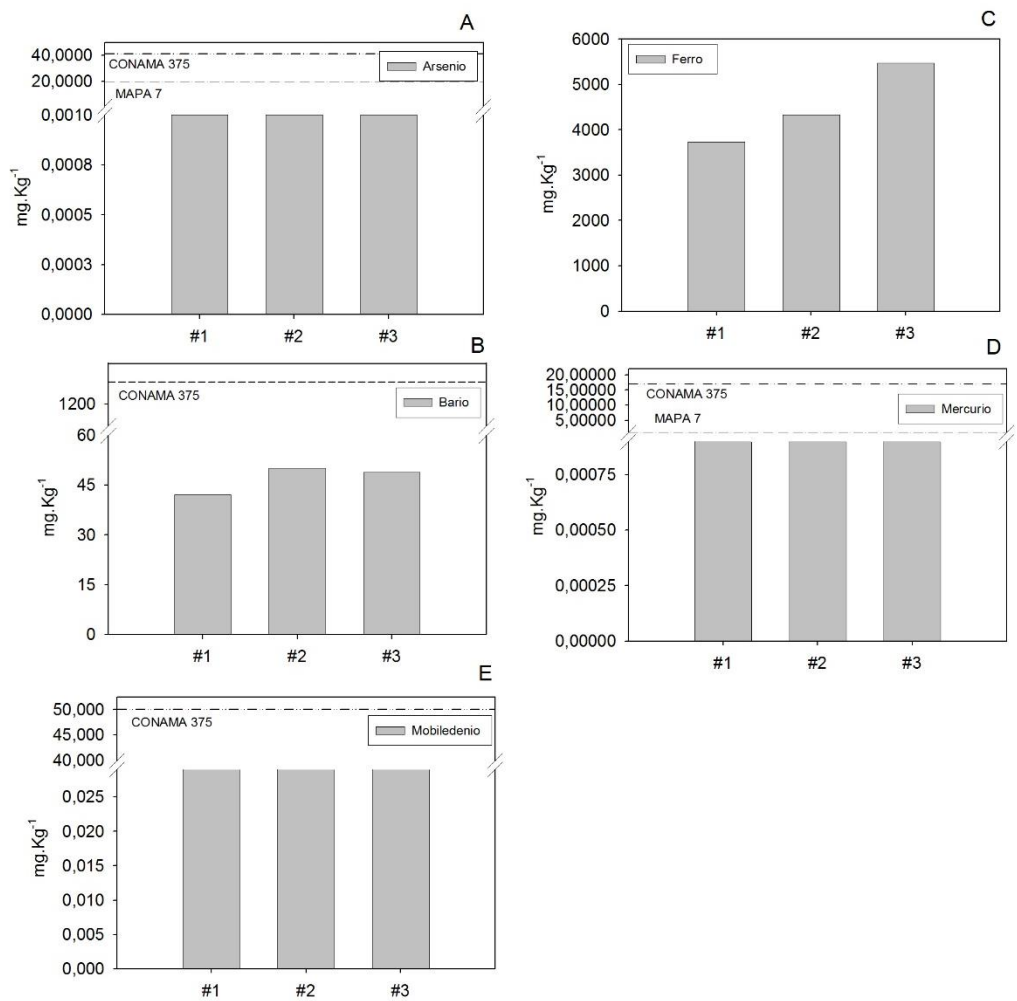
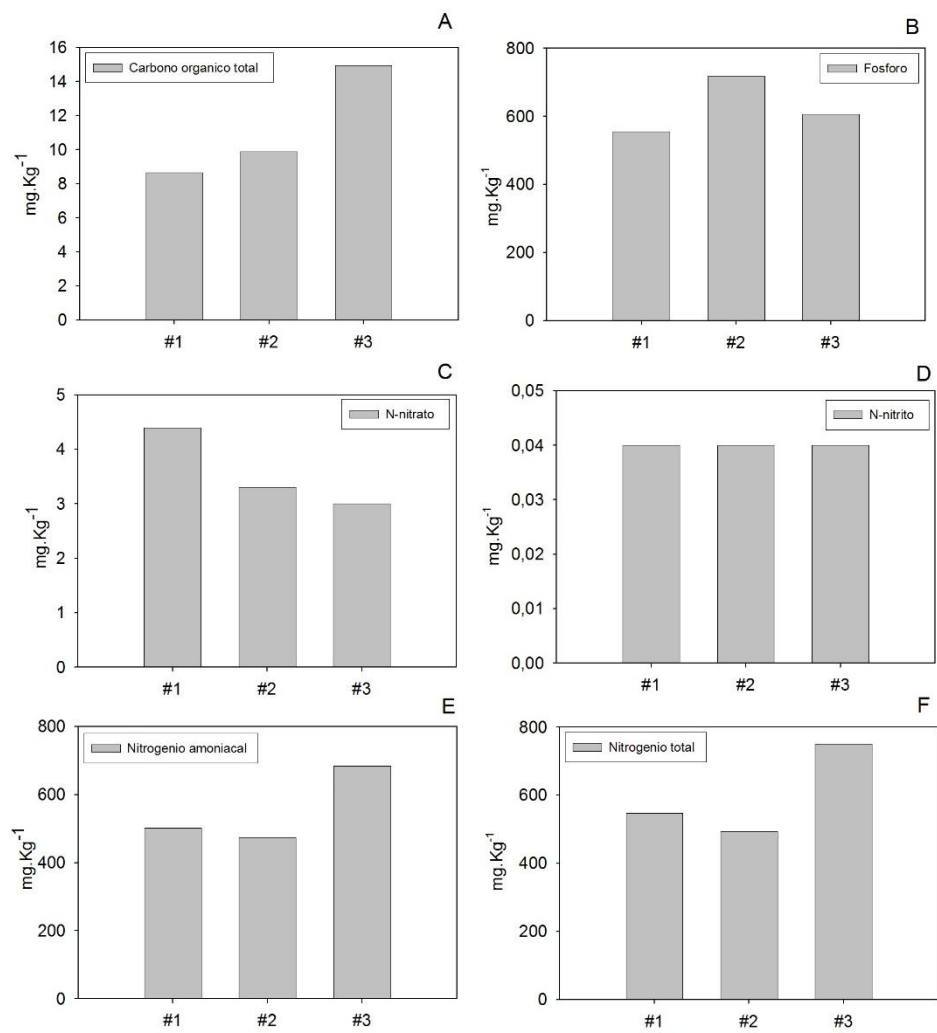


Figura 10 - Concentração média e desvios padrão, dos macro nutrientes expressos em mg.Kg^{-1} , detectados na amostra composta (Iodo12).



8 PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)

8.1. Artigo submetido

Um artigo com as diretrizes iniciais para gerenciamento do lodo de esgoto armazenado no *geobag* com uma proposta de destinação final para o lodo de esgoto armazenado.

8.2. Protocolo analítico de destinação de resíduo de dragagem

Protocolo de caracterização de lodo de esgoto dragado de sistema tratamento de efluentes, a fim de subsidiar novas operações de reutilização e dar o melhor destino ao resíduo do impacto inerente a operação de dragagem.

PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO PADRÃO		
POP TÍTULO: SEDIMENTABILIDADE DO LODO	CONTROLE FÍSICO- QUÍMICO ETE P.O.P. N° 001	DATA: 03/10/20 PAGINA 1/2

1 Definições

I – amostra: substância, material ou produto que é parte de um todo;

II – amostra composta: mistura de várias alíquotas, colhidas no mesmo ponto de amostragem durante um período de tempo pré-estabelecido, ou em diferentes pontos de amostragem, a fim de constituir uma única amostra homogeneizada;

III – amostragem: processo de obtenção de amostras realizado com representatividade, replicação e distribuição determinadas

IV – lodo de esgoto: resíduo sólido não consolidado, composto por substâncias minerais e orgânicas gerados nos processos de tratamento de esgoto sanitário. Pode ser proveniente do tratamento na ETE, de sistema estático, entre outros.

V – biossólido: a denominação do lodo de esgoto, tratado ou processado, com características que permitam sua reciclagem de maneira racional e ambientalmente segura.

VI – procedimento operacional padrão (POP): documento que descreve detalhadamente as ações necessárias para a realização de uma tarefa rotineira.

2 Processo

Realizar a caracterização química e biológica do lodo dragado de sistema de tratamento de esgoto avaliando alternativas de disposição final.

3 Objetivo

Estabelecer as bases normativas para o reaproveitamento seguro e estabelecer procedimentos a serem adotados para análise de lodo de esgoto com finalidade de uso agrícola.

Caracterizar o lodo de esgoto quanto a presença de substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas (metais);

- Caracterizar o risco biológico através da presença de agentes patogênicos (vírus entéricos, ovos de helmintos, *Samonella* e coliformes termotolerantes);

- Avaliar a adequação para aplicação agrícola do bio sólido previamente caracterizado.

4 Aplicação

Os sistemas de tratamento de esgoto geram uma significativa quantidade de resíduo sólido, geralmente negligenciadas nos países em desenvolvimento (IADC, 1997). Como produção do lodo ocorre pelo processo de digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, apresentando elevado teor de material orgânico com poder fertilizante, por conter elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas, tais como fósforo, nitrogênio e potássio, possui uma aplicabilidade elevada na agricultura (SANTOS, 2009). Como o material tem grande teor de matéria orgânica, esta característica que agrega valor ao produto, e favorece sua utilização na agricultura. O principal problema quanto à disposição e reutilização de sedimentos dragados, consiste na possível presença de metais pesados, contaminantes orgânicos e patógenos, capazes de provocar sérios danos à saúde humana, a flora e a fauna terrestre.

Diversos estudos realizados com lodo de esgoto foi constatado a presença de metais potencialmente tóxicos, aumentando a persistência em solos ou na vegetação; emissões de gases de efeito estufa (por exemplo, metano - CH_4 e óxido nitroso - N_2O) e a liberação de compostos odoríferos, contaminantes orgânicos (alguns deles compostos orgânicos persistentes, resíduos farmacêuticos e cosméticos), além de ser uma fonte significativa de poluição micro plásticos no ambiente (COLLIVIGNERI et al, 2019; SANTOS et al, 2020; LI, 2018).

Logo, surge a necessidade avaliação e análises físico-químicas, microbiológicas desses materiais, a fim de garantir segurança nas aplicações.

5 Princípio

Determinação dos parâmetros físico químicos e microbiológico de amostra de lodo de esgoto com finalidade para uso agrícola.

A caracterização da amostra se fundamenta na Resolução 375 do CONAMA de 2006 (BRASIL, 2006), que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Segundo essa mesma resolução a caracterização do lodo de esgoto deve incluir: potencial agrônômico; substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas (Tabela 1); indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos (Tabela 2); e estabilidade.

A Instrução Normativa IN nº 07 de 2016, estabelece os limites para contaminantes, determina limites máximos admitidos em substrato para plantas, de agentes fitotóxicos, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, condicionadores de solo e substrato para plantas (MAPA, 2016).

Tabela 8 - Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto para substâncias inorgânicas na aplicação agrícola de lodo de esgoto, segundo CONAMA 375/2006 (mg.Kg⁻¹, base seca). IN 7 do MAPA/2016 que determina os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo.

Parâmetro	CONAMA 375/2006	IN 7/2016	Diretiva 86/278/EEC
Arsênio	41	20	SE
Bário	1300	SE	SE
Cádmio	39	3	20-40
Chumbo	300	150	750 -1200
Cobre	1500	SE	1000 -1750
Cromo	1000	2	SE
Mercúrio	17	1	16-25
Molibdênio	50	SE	SE
Níquel	420	70	300 -400
Selênio	100	80	SE
Zinco	2800	SE	2500-4000

Fonte: BRASIL, 2006; MAPA 2016.

Para fins de possível utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70. A aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados no solo agrícola somente poderá ocorrer mediante a existência de uma liberação devidamente licenciada pelo órgão ambiental competente.

Tabela 9 - Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos.

Tipo do lodo	Concentração de patógenos
A	1.000 NMP/g ST Coliformes Termotolerantes; < 0,25 ovo / g de ST helmintos; ausência em 10 g de ST Salmonella; < 0,25 UFP ou UFF / g de ST Vírus
B	< 10 ⁶ NMP / g de ST Coliformes Termotolerantes; < 10 ovos / g de ST ovos viáveis de helmintos

Fonte: CONAMA 375/2006.

A reciclagem de lodos de esgoto representa uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente segura. O material orgânico presente aumenta a resistência dos solos à erosão, é fonte de nutrientes como nitrogênio e fósforo constituindo-se em boa alternativa para regiões agrícolas, especialmente aquelas caracterizadas pelo uso intensivo do solo ou em que há a proposição de técnicas de reflorestamento, trazendo retorno econômico para a atividade agrícola. A vantagem em termos climáticos está na utilização de produtos derivados de biomassa de origem renovável, recicla-se o carbono, reduzindo as emissões e compostos nocivos. A reciclagem agrícola contribui com o ciclo bioquímico dos nutrientes minerais, fornecendo matéria orgânica ao solo, estocando, assim, o carbono na forma de compostos estáveis e não liberando CO₂ na atmosfera (ANDREOLI, 2001; FREDDO, 2014).

6 Precaução de segurança

Usar todos os equipamentos adequados a possível contaminação microbiológica para execução desta análise.

7 Reagentes utilizados

Não aplicável.

8 Aparelhagens utilizadas

No quadro abaixo pode-se observar os materiais e fundamentos de sua utilização para coleta e armazenamento das amostras para análises físico, químicas e microbiológicas.

Tabela 10 Materiais utilizados na coleta.

Materiais	Utilização
Tubo de PVC	Coleta de amostras
Luvas	Coleta de amostras
Tambor para homogeneização	Composição da amostra composta
Caixa térmica	Armazenamento de amostra
Saco autoclavável	Armazenamento de amostra
Pacetas Inox	Manipulação de amostras
Balança digital	Pesagem de alíquotas/lodo
Capsula de Vidro	Envio e armazenamento de amostra
Frascos estéreis de vidro	Envio e armazenamento de amostra
Geladeira	Armazenamento de amostra
Caixa térmica	Envio das amostras

9 Preparação de soluções e reagentes

Não aplicável.

10 Procedimentos

A coleta é baseada na Norma Brasileira NBR nº10.007 - Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004).

- Categoria do usuário que gerou o lodo (residencial, comercial, industrial ou público, com a identificação do usuário do sistema de esgotamento sanitário, se possível) e município de origem;
- Selecionar e sinalizar os locais de coleta.
- Anotar na ficha de coleta o endereço completo do local e se possível tomar as coordenadas (latitude e longitude), através de GPS e fotografar o local da coleta;
- Calçar as luvas
- Em caso de *geobags* abrir flanges selecionados.
- Coletar os sólidos com amostrador linear tipo tubo de PVC com diâmetro mínimo de 2" e comprimento que seja a altura aproximada do *geobag*.
 - Após introduzir, fechar a extremidade do tubo com a luva de PVC no diâmetro do tubo para gerar vácuo.
 - A amostra deve ser coletada todos os sentidos a partir do flange, o tubo PVC deve ser introduzido: uma vez no centro em sentido ao chão ou fundo do *geobag*, duas na direção longitudinal ao *geobag*, uma para a esquerda e outra para a direita, totalizando 5 retiradas com o tubo de PVC.
- Retirar o tubo com o material e transferir para um recipiente apropriado (tambor) tirando a luva, permitindo ao material escorrer pelo tubo.
 - Preparar amostra para análise: As amostras coletadas em cada flange da unidade *geobag* devem ser homogeneizada no tambor por repetidas vezes gerando uma amostra representativa por unidade *geobag*.
- Após a homogeneização é recolhido uma alíquota representativas nos fracos estéreis de vidro para as análises do laboratório terceirizado.

- Acondicionar as amostras: Coletada a alíquota representativa de cada flange do *geobag*, em recipiente vedado e extremamente seco, isento de umidade, embalagens limpas por fora.
 - Remova a tampa do frasco do laboratório; com todos os cuidados de assepsia.
 - Coletar a amostra (100 a 200 mL), deixando um espaço dentro do frasco suficiente para sua homogeneização.
 - Identifique a amostra e preencha a ficha de coleta.
 - Data, hora e local de recebimento.
- Acomode as amostras na caixa de coleta ou caixa de isopor.
 - Se possível lacrar a caixa.
 - As amostras devem ser conservadas sob refrigeração até a chegada ao laboratório.
 - O prazo para análise é de até 24 h.
- Encaminhar as amostras para análise em laboratório;
 - Determinação de substâncias inorgânicas: Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Selênio (Se) e Zinco (Zn) nas amostras de lodo de esgoto.
 - Determinação de indicadores microbiológicos e patogênicos: Coliformes termotolerantes, *Salmonella*, ovos viáveis de helmintos, vírus entéricos.
 - Determinação do potencial de uso agrônômico do lodo de esgoto como adubo: carbono orgânico, Nitrogênio total, Nitrogênio Orgânico (Kjeldahl), Nitrogênio amoniacal, Nitrogênio nitrato/nitrito, Fósforo total e Sólidos voláteis e Sólidos Totais no lodo de esgoto.
- Realizar análise do lodo de esgoto comparando com as Resoluções de referência;
 - CONAMA 375/2006 (BRASIL, 2006);
 - MAPA IN 7/2016 (MAPA, 2016);

11 Preservação das amostras

As técnicas de preservação são vitais para minimizar alterações das amostras e com relação a análises futuras. Alguns preservativos comuns estão descritos abaixo:

- Congelamento – é um método de preservação que pode ser aplicado para aumentar o intervalo de tempo entre a coleta e a análise, para maior parte dos

parâmetros de composição química. Não pode ser usado para a determinação de teor de sólidos filtráveis e não filtráveis ou de qualquer parâmetro nessas frações, pois os componentes dos resíduos em suspensão se alteram com o congelamento e posterior descongelamento.

- Refrigeração – Manter as amostras entre 1°C e 4°C preservará a maioria de características físicas, químicas e biológicas em curto prazo (< 24 horas) e como tal é recomendado para todas as amostras entre coleta e entrega para o laboratório. É recomendado para amostras microbiológicas ser refrigerada entre 2°C e 10°C. O gelo pode ser rapidamente usado para resfriar amostras para 4°C antes do transporte. As barras de gelo reutilizáveis são preferidas ao invés de gelo solto. Lembrando que o gelo não deve entrar em contato com as amostras.

12 Identificação das amostras

Os pontos de coleta devem ser detalhadamente descritos na ficha de coleta, incluindo:

- Coordenadas;
- Condições hidrológicas;
- Condições meteorológicas no dia da coleta e nas últimas vinte e quatro horas ou quarenta e oito horas.

13 Acondicionamento das amostras

Após a coleta das amostras, as mesmas devem ser cuidadosamente acondicionadas para evitar avarias e contaminação, e transportadas ao laboratório, no tempo necessário para que sua análise ocorra dentro do prazo de validade da preservação.

14 Transporte das Amostras

O transporte das amostras deve ser realizado em caixas térmicas, que permitam o controle da temperatura e seu fechamento através de lacres (se possível numerado). Normalmente a temperatura, de transporte, é de - 4°C. Caso não seja possível o uso de caixas térmicas, pode ser utilizado caixa de isopor com gelo reciclável, buscando evitar o contato direto do gelo com as amostras.

Os seguintes procedimentos são recomendados ao preparar a amostra para transporte:

- Colocar os frascos na caixa de amostras de tal modo que fiquem firmes durante o transporte;
- Nos casos em que se usar gelo para preservação, cuidar para que os frascos, ao final do transporte não fiquem submersos na água formada pela sua fusão o que aumentaria o risco de contaminação.
- Evitar a colocação de frascos de uma mesma amostra em caixas diferentes.

15 Classificação do Lodo quanto à Presença de Patógenos

- Classe A:
 - Coliformes fecais, densidade inferior a 10³ NMP/g ST (Número Mais Provável por grama de Sólidos Totais).
 - *Salmonella sp*, densidade inferior a 3 NMP/4g ST (Número Mais Provável por 4 g de Sólidos Totais).
- Classe B:
 - Densidade de coliformes fecais do mesmo for inferior a 2 x 10⁶ NMP/g ST.
 - Uso agrícola torna-se restrito à cultura do café, a silvicultura e às culturas de fibras e óleos

16 Disposição e alternativas de usos

Caso os parâmetros se mostrem em divergência com a legislação ou o lodo não apresente características de lodo de esgoto Classe A, recomenda-se tratamentos sanitários ou demais usos:

- Caleação:
 - Cal virgem (CaO) ou cal hidratada (CaOH) ao lodo de esgoto, elevando o pH da mistura até que o ambiente se torne inapropriado à vida (pH acima de 11,5).
 - Produz grande quantidade de gás amônia durante a mistura.
 - Questionável, pois ovos viáveis de helmintos têm sido recuperados em lodos caleados, além do fato de que o óxido de

cálcio (CaO) e o hidróxido de cálcio (CaOH) são agressivos às plantas (SANTOS, 2020; CORRÊA, 2007).

- Santos *et al.* (2020) em Portugal destacam como alternativa sustentável o uso de resíduos como a casca de ovo nesse processo de higienização levando à completa eliminação de *E. coli*
- Compostagem:
 - Elevar o pH a um valor maior ou igual a 12, criando um meio que não permite a sobrevivência da maioria dos microrganismos (GONZALEZ *et al.*, 2019).
 - Remoção de ovos de helmintos, organismos patogênicos e parasitas, diminuição a disponibilidade de metais pesados, reduzindo seu risco de bioacumulação e de lixiviação (CORRÊA, 2007).
- Reuso industrial (fabricação de agregado leve, cimento, tijolos e cerâmica):
 - Fator limitante a umidade do lodo de esgoto.
 - Custos com transporte.
- Uso como substrato vegetal:
 - Promove o aproveitamento de nutrientes e matéria orgânica, presentes no lodo.
 - As concentrações de metais pesados na amostra de lodo de esgoto do estudo não impõem restrições de uso desse lodo para a fabricação do substrato, uma vez que atendem aos padrões estabelecidos na legislação
- Recuperação de solos (em áreas degradadas e de mineração):
 - Aspectos sanitários, que limitam o uso de lodos de esgoto na agricultura, não são impedimentos para o uso deles na recuperação de áreas degradadas pela mineração (CORRÊA, 2007).
 - A vantagem econômica deve-se a sua grande disponibilidade nas estações de tratamento,
 - As dificuldades encontradas relacionam-se a seu transporte, manuseio e aplicação, por causa do elevado teor de umidade que lodos de esgotos contêm (85 - 88%).
- Uso florestal, silvicultura:

- A produção de mudas florestais é uma alternativa viável, sendo o material usado como adubo para plantios de recomposição florestal ou condicionador de solos para recuperação de áreas degradadas, possibilitando maior atração do ponto de vista ambiental, visto que nessas atividades seriam realizadas em apenas uma ou duas aplicações (ABREU et al., 2019).
- Aporte de macronutrientes (N e P) e a maior capacidade de troca catiônica.
- Aumento de produtividade (SILVA et al., 2010).

17 Bibliografia

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2004b **NBR 10.007**: Resíduos sólidos – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, Brasil, 21 pp.

BRASIL. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, SEMA, 2006

MAPA. **IN 07 de 12 de abril de 2016**. Limites máximos de contaminantes admitidos em substrato para plantas. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016.