UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

APLICABILIDADE DO LODO DE ESTACÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIA NO CULTIVO DE EUCALIPTO E COMPARACÃO ECONOMICA COM FERTILIZANTE MINERAL

Gustavo Alves Louzada Flávio

GOIÂNIA

DEZEMBRO/2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Gustavo Alves Louzada Flávio

APLICABILIDADE DO LODO DE ESTACÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIA NO CULTIVO DE EUCALIPTO E COMPARACÃO ECONÔMICA COM FERTILIZANTE MINERAL

Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Drº Eraldo Henriques de Carvalho

GOIÂNIA
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Gustavo Alves Louzada Flávio

APLICABILIDADE DO LODO DE ESTACÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIA NO CULTIVO DE EUCALIPTO E COMPARACÃO ECONOMICA COM FERTILIZANTE MINERAL

Monografia apresentada na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Drª Eraldo Henriques de Carvalho

Data de aprovação: 06/12/2017

Prof. Drª Eraldo Henriques de Carvalho (Orientador)

Prof. Drª Francisco Javier Cuba Terán (Examinador)

Prof. Drª Saulo Bruno Silveira e Souza (Examinador)

RESUMO

O papel do setor industrial no desenvolvimento econômico do país é importante, e a população está dando mais importância as consequências de seus processos produtivos devido os impactos ambientais decorrentes de suas atividades, entre eles, resíduos sólidos, emissões atmosféricas e efluentes. O lodo é um resíduo gerado no tratamento de efluentes e constitui fonte de matéria orgânica e de nutrientes para as plantas e sua aplicação no solo pode trazer benefícios à agricultura. A aplicação do lodo na agricultura é uma prática utilizada mundialmente, porém ele pode ser portador de grande quantidade de metais pesados, patógenos e outros poluentes que podem causar sérios danos ambientais. A partir dos riscos, foi estabelecido a norma CETESB P4.230/1999, a qual define critérios de aplicação de lodos em áreas agrícolas. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de lodo da Estação de tratamento de Efluentes de uma empresa agroindustrial de atomatados de grande porte, no cultivo de eucalipto e compará-lo economicamente com os fertilizantes minerais. Os dados foram obtidos através da análise de parâmetros estabelecidos pela norma CETESB P4.230/1999 e NBR 10.004/2004. As análises laboratoriais realizadas a base seca apresentam todos resultados abaixo do limite, enquanto que as do solubilizado e lixiviado apresentam concentrações dos parâmetros abaixo do permitido pelas normas supracitadas, com exceção do solubilizado de manganês e alumínio. O lodo da indústria estudada apresenta características fertilizantes e pode ser utilizado para aplicação agrícola no cultivo de eucalipto. A economia de fertilizantes minerais é alto e pode ser levado em conta para o aproveitamento desse resíduo de forma sustentável.

Palavras chave: agricultura, eucalipto, fertilizante mineral, lodo

ABSTRACT

The role of the industrial sector in the economic development of the country is important, and the population is giving more importance to its productive processes consequences due to their environmental impacts generated by their activities, among them solid wastes, atmospheric emissions and wastewater. Sludge is a waste generated in the wastewater treatment and constitutes a source of organic matter and of nutrients for the plants and its application in the soil can bring benefits to agriculture. The application of sludge in agriculture is a practice used worldwide, but it can carry large amounts of heavy metals, pathogens and other pollutants that can cause serious environmental problems. From the risks, CETESB standard P4.230/1999 was established, which defines criteria for the application of sludge in agricultural areas. Thus, the present work had the objective of evaluating the application of sludge from the Wastewater Treatment Station of an tomato agro-industrial company in the cultivation of eucalyptus and comparing it economically with the mineral fertilizers. The data were obtained through the analysis of parameters established by the CETESB standard P4.230 / 1999 and NBR 10.004 / 2004. The laboratory analyzes performed on the dry basis show all results below the limit and those of solubilized and leached have concentrations of the parameters below that allowed by the aforementioned standards, with the exception of solubilized manganese and aluminum. The sludge of the studied industry presents characteristics fertilizers and can be used for agricultural application in the cultivation of eucalyptus. The economy of mineral fertilizers is high and can be taken into account for the use of this waste in a sustainable way.

Keywords: Agriculture, eucalyptus, mineral fertilizer, sludge

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Consumo de Fertilizantes Minerais (NPK).....18
Figura 3.1: Etapas do processo de tratamento de efluentes da indústria até ponto de geração do lodo do experimento.....20
Figura 3.2: Tratamento utilizado para o lodo na indústria estudada.....21
Figura 3.3: Centrífuga e baia metálica circulada em vermelho.....22
Figura 4.1 – Classificação de resíduos não perigosos.....28
Figura 4.2: Geração de lodo em 2016.....33

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre espécies de eucalipto mais utilizadas na região central do Brasil.....10
Tabela 2.2: Doses recomendadas de nitrogênio para florestamento de eucalipto.....11
Tabela 2.3: Doses recomendadas de potássio para florestamento de eucalipto.....12
Tabela 2.4: Recomendação de zinco e cobre para Eucalipto de acordo com o disponível no solo 12
Tabela 2.5: Recomendação de fósforo para Eucalipto de acordo com o teor de argila e de fósforo disponível no solo.....12
Tabela 2.6: Monitoramento do solo de locais com aplicação agrícola de lodo de esgoto 15
Tabela 2.7: Frequência de monitoramento de lodo.....16
Tabela 2.8: Concentração máxima de metais permitida para aplicação de lodos em solos agrícolas 16
Tabela 2.9: Critério de classificação de densidade de microrganismos para aplicação agrícola.....17
Tabela 2.10: Carga acumulada máxima de substâncias inorgânicas presentes em lodos aplicados em solos agrícolas.....17
Tabela 4.1: Caracterização do lodo estudado, confrontada com os valores máximos normatizados.....29
Tabela 4.2: Concentrações de Arsênio, Selênio e Mercúrio presentes no lodo e limites da NBR 10004:2004.29
Tabela 4.3: Taxas de aplicação de lodo por nutriente.....30
Tabela 4.4: Taxa máxima de aplicação de lodo pela concentração de nitrogênio 30
Tabela 4.5: Carga máxima acumulada de metais para aplicação agrícola de lodo.....31
Tabela 4.6: Taxa de aplicação de cada fertilizante mineral.....32
Tabela 4.7: Taxa de aplicação de cada fertilizante mineral composto.....32
Tabela 4.8: Taxa de aplicação de cada fertilizante mineral composto.....34

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
IFA	International Fertilizer Industry Association
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
WWF	World Wildlife Fund

SUMÁRIO

1.INTRODUCÃO **2**

1.1 Objetivos 4

1.1.1. Objetivo Geral 4

1.1.2. Objetivos Específicos 4

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **5**

2.1. PRODUCÃO DE TOMATE NO BRASIL 5

2.2. TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS 5

2.3. GERENCIAMENTO DE LODOS 6

2.4. ALTERNATIVAS DE DESTINACÃO FINAL DE LODOS GERADOS EM SISTEMA DE TRATAMENTO 7

2.5. CULTURA DO EUCALIPTO 9

2.6. LEGISLACÃO DE APLICACÃO AGRÍCOLA DE LODOS DE ESGOTOS E INDUSTRIAIS 14

2.7. FERTILIZANTES MINERAIS 17

3. METODOLOGIA 20

3.1. CARACTERIZACÃO DA INDÚSTRIA ESTUDADA 20

3.2. CARACTERIZACÃO DO LODO INDUSTRIAL ESTUDADO 22

3.2.1. Amostragem 22

3.2.2. Parâmetros utilizados na caracterização do lodo 23

3.3. LEGALIDADE DA APLICACÃO AGRÍCOLA 23

3.4. ESTIMATIVA DA TAXA DE LODO INSDÚSTRIAL PARA O CRESCIMENTO DA ESPÉCIE DE EUCALIPTO ESTUDADA 24

3.4.1. Substrato agrícola 24

3.4.2. Estimativa da taxa de aplicação para cada nutriente 24

3.4.3. Estimativa da taxa máxima de aplicação de lodo 24

3.4.3.1. Nitrogênio 24
3.4.3.2. Substancias Inorgânicas 25
3.4.4. Taxa de aplicação do lodo selecionada 25
3.5. SELECÃO DO FERTILIZANTE MINERAL E SUA TAXA DE APLICACÃO 26
3.6. COMPARACÃO DE CUSTO 26
4. **RESULTADOS** 28
4.1. CARACTERIZACÃO DO LODO E APLICACÃO AGRÍCOLA 28
4.1.1. Metais Pesados 28
4.1.2. Microrganismos 29
4.2. TAXA DE APLICACÃO DE LODO 30
4.2.1. Taxa de aplicação de lodo para cada nutriente 30
4.2.2. Taxas máximas de aplicação de lodo 30
4.2.3. Taxas de aplicação de lodo 31
4.3. TAXA DE APLICACÃO DE FERTILIZANTE MINERAL 31
4.4. COMPARACÃO ECONOMICA 32
5. CONCLUSÃO 34
6. REFERENCIAS 35

1. INTRODUÇÃO

Um assunto muito discutido atualmente é a preservação do meio ambiente. As empresas estão dando mais importância às consequências dos seus processos produtivos, ou seja, aos impactos ambientais de suas atividades, entre eles, resíduos sólidos, emissões atmosféricas e efluentes (SILVEIRA, 2010).

O papel do setor industrial no desenvolvimento econômico do país é importante, e por gerarem os variados tipos de resíduos, sejam líquidos, sólidos ou gasosos (PINHEIRO, 2008), são alvos de grande atenção do Estado, sociedade, clientes e interessados.

Nos sistemas de tratamento de efluentes, ocorre a geração de resíduo semi sólido, pastoso e predominantemente orgânico, denominado lodo de Estação de Tratamento de Efluentes - ETE. É usual que no projeto da estação de tratamento de efluentes seja negligenciado o gerenciamento de lodo, sem que esta atividade seja tratada sem planos prévios e frequentemente sob condições emergenciais (ANDREOLI et al., 2007).

O gerenciamento do lodo de ETE é complexo e geralmente oneroso, e se mal realizado, pode comprometer as vantagens esperadas do sistema de tratamento. Embora o lodo apenas represente entre 1 e 2% do volume de efluente tratado, seu gerenciamento tem custo de 20% a 60% dos custos totais de operação da ETE (ANDREOLI et al., 2007).

Em geral, o lodo de ETE apresenta elevado teor de matéria orgânica, microrganismos e nutrientes minerais, os quais podem ter características fertilizantes, porem pode apresentar riscos ambientais e sanitários. Os riscos estão associados a constituintes indesejados: metais pesados, organismos patogênicos e contaminantes orgânicos. (ANDREOLI et al., 2007).

A partir dos riscos, foi estabelecido a norma CETESB P4.230/1999, a qual define critérios de aplicação de lodos de sistema de tratamento biológico em áreas agrícolas, apresentando limites aplicáveis para agentes biológicos e para metais pesados, entre outras informações.

De acordo com Andreoli et al. (2007), ao passo que a geração de lodo e o custo do seu gerenciamento aumenta, a tendência do reaproveitamento energético, reciclagem e utilização agrícola também cresce. A Grã Bretanha, França, e Dinamarca são os países europeus com maior destinação agrícola dada ao lodo, com taxas 46, 40 e 37%, respectivamente (BONNIN, 1998 *apud* PAREDES FILHO, 2011).

As indústrias estão buscando alternativas para minimizar seus custos e impactos negativos causados por eles, sendo elas recuperação, reaproveitamento (PINHEIRO, 2008), desaguamento, aplicação no solo, incineração (ANDREOLI et al., 2007), entre outros.

A maioria das publicações encontradas por Castro et al. (2015) que faz referencia ao uso de lodo em aplicações no solo tem finalidade de melhorar as características físicas, químicas e biológicas, enriquecer ou recuperar os solos para produção agrícola, reduzir custos de produção pela substituição de adubos químicos e aumentar produtividade das culturas.

Trabalhos da década de 70 e 80 do potencial agrícola de lodo de esgoto já indicavam melhoria das propriedades químicas e físicas do solo, aumento da produção agrícola, redução do custo de fertilizantes e redução dos impactos negativos ao ambiente, atraindo diversas empresas florestais para uso do lodo (FIRME, 2009).

Segundo Malta (2001), o lodo de esgoto é um resíduo que melhora as propriedades físicas do solo para um melhor desenvolvimento das plantas. As propriedades analisadas foram densidade, porosidade e capacidade de retenção de água. Ele também eleva a fertilidade, pH, reduz o teor de Al trocável, aumentando a capacidade de troca de cátions e a capacidade de fornecer nutrientes as plantas.

Castro et al. (2015) aponta a predominância do uso agrícola como alternativa mais utilizada para disposição de lodo no Brasil, na produção vegetal e recuperação de áreas degradadas. As principais culturas testadas no Brasil com aplicação de lodo de esgoto, foram milho (19,9%), arroz, feijão, soja, milheto e aveia (9%) e eucalipto (7,6%).

O gênero eucalipto, envolvendo mais de 600 espécies, é utilizado em estudos com aplicação de lodo devido ser adaptado a diferentes climas e solos e ter diferentes utilidades. O eucalipto pode ser plantado com fins ornamentais, produção de mel e, principalmente, extração de madeira (HIGA et al., 2000).

Os fertilizantes minerais apresentam impactos negativos não apenas ao meio ambiente, mas também a agricultura. A maioria causa acidificação do solo, esgotamento do húmus do solo e emissão de gases estufa.

Diante disso, deve se estudar o potencial uso e benefícios do lodo de esgoto para cultivo de eucalipto como forma de reciclagem desse resíduo, assim economizando recursos financeiros da destinação final e fertilizantes minerais.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a aplicabilidade de lodo da Estação de tratamento de Efluentes de uma empresa agroindustrial no cultivo de eucalipto e compará-lo economicamente com os fertilizantes minerais.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o lodo da indústria em questão
- Avaliar a legalidade da aplicação agrícola do lodo estudado;
- Determinar a taxa de aplicação do lodo para a cultura de eucalipto e área necessária para sua disposição;
- Estimar quantidade equivalente de fertilizante mineral;
- Efetuar a comparação do custo entre a aplicação do lodo estudado e o fertilizante mineral

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUCÃO DE TOMATE NO BRASIL

Segundo Makishima e Melo (2005), o tomate é a espécie mais importante sob o ponto de vista econômico e social do grupo das hortaliças. O Brasil é o oitavo maior produtor de tomate, produzindo o dobro da média da produtividade mundial.

A safra de 2016 produziu mais de 3,6 milhões de toneladas em 60 mil hectares, o que apresenta rendimento médio de quase 64 toneladas por hectare (LSPA/IBGE, 2017). Do total, 70% são destinados ao mercado para consumo ao natural e o restante é utilizado como matéria-prima para industrialização, elaborando diversos produtos, como molho, extrato, polpa, suco e outros (MAKISHIMA e MELO, 2005).

2.2. TRATAMENTO DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS

A indústria alimentícia de atomatados gera grande quantidade de efluentes. A partir da resolução CONAMA n 357, de 17 de Marco de 2005, o qual estabelece que “Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após devido tratamento e desde que obedeçam as condições, padrões e exigências dispostos nesta resolução e em outras normas aplicáveis”, tornou-ser obrigatório um sistema de tratamento de efluentes nas empresas (SILVEIRA, 2010).

O tratamento pode ser divido em preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar é a etapa inicial do processo que remove os sólidos em grosseiros e areia. Os mecanismos de remoção são de ordem física, como peneiramento e sedimentação. Além disso, inclui-se também a medição de vazão. Os principais objetivos desse tratamento é a proteção dos dispositivos de transporte (bombas e tubulações), proteção das unidades de tratamento posteriores e proteção dos corpos receptores (SPERLING, 2005).

O efluente, após tratamento preliminar, passa pelo tratamento primário, o qual se destina a remover sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes. Uma parte deles é compreendida pela matéria orgânica. Assim, a remoção desses sólidos reduz a carga orgânica encaminhada para o tratamento secundário (SPERLING 2005).

O principal objetivo do tratamento secundário é a remoção de matéria orgânica. Os seus processos são concebidos de forma a acelerar os mecanismos de degradação que ocorrem naturalmente nos corpos receptores. A base do tratamento é o contato efetivo de microrganismos (bactérias, protozoários, fungos etc.) com o material orgânico, assim sendo consumido como alimento. Existe uma grande variedade de tecnologias de tratamento, sendo os mais comuns as lagoas de estabilização, lodos ativados, filtro biológico, tratamento anaeróbico e disposição sobre o solo (SPERLING, 2005).

Os subprodutos sólidos gerados no tratamento dos efluentes são, de maneira geral, material gradeado, areia, escuma, lodo primário e lodo secundário. Em termos de volume e importância, o mais relevante desses é o lodo.

2.3. GERENCIAMENTO DE LODOS

O termo “lodo” tem sido usado para designar o produto sólido de uma estação de tratamento. O lodo primário é oriundo do tratamento primário, onde há remoção de sólidos. Nos processos de tratamento biológico, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida em massa microbiana, esse conhecido como lodo biológico ou secundário (ANDREOLI, 2007).

A produção do lodo é função dos sistemas de tratamentos utilizados na fase líquida. Todo tratamento biológico gera lodo secundário, enquanto o lodo primário, gerado nos processos primários é composto pelos sólidos do efluente bruto (SPERLING, 2002).

Andreoli (1998) cita que os lodos são ricos em matéria, orgânica, fósforo e micronutrientes, o que possibilita seu uso na agricultura como fertilizantes, mas necessita de avaliação dos riscos potenciais.

Conforme Andreoli (2000), as principais etapas do processamento e gerenciamento do lodo nas ETE´s e seus objetivos são:

• Descarte do lodo: onde os lodos excedentes são retirados e encaminhados para estabilização, adensamento, condicionamento ou desaguamento, conforme as características do lodo bruto;

• Estabilização: redução de sólidos voláteis, do volume e do potencial de geração de odores e atração de vetores;

• Adensamento: aumento da concentração de sólidos.

• Condicionamento: preparo para desaguamento, principalmente mecânico, através da aplicação de polímeros;

• Desaguamento: remoção da umidade (13 a 70% de ST) visando reduzir o volume e peso de lodo para disposição final;

• Higienização: redução do potencial de disseminação de patógenos;

• Estocagem: Acondicionamento do lodo enquanto aguarda a disposição final;

• Disposição final: uso agrícola ou aterro sanitário licenciado.

2.4. ALTERNATIVAS DE DESTINACÃO FINAL DE LODOS GERADOS EM SISTEMAS DE TRATAMENTO

O maior desafio atual é que o lodo tenha uma destinação ambientalmente correta, evitando deposito em corpos receptores. Para isso, a destinação pode ocorrer de diferentes formas, dentre elas aterros sanitários, incineração, uso agrícola, entre outros (PEDROZA et al., 2010 *apud* AFAZ, 2016).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos dispõe da ordem de priorização na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. A ordem é composta por não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada, assim o uso agrícola tem prioridade se comparado com a incineração e aterros sanitários.

A PNRS possui o objetivo de não geração de resíduos, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos, bem como disposição ambiental adequada. A aplicação agrícola é interessante visto que pode enquadrado como reciclagem.

Andreoli et al. (1998) dizem que das alternativas de destinação do lodo, a reciclagem agrícola é a mais promissora tanto do aspecto ambiental quanto econômico.

O lodo de esgoto apresenta duas partes valoráveis, sendo elas matéria orgânica e fosfatos. Através da mineralização, a matéria orgânica pode ser seguramente disposta e reutilizada em aplicações agrícolas. Os fosfatos podem ser recuperados e reutilizados na indústria química e

de fertilizantes, ou permanecer fixado nos biossólidos para uso agrícola (BALMER, 2004 *apud* MANZOCHI, 2008).

O componente mais crítico e valorizado no lodo de esgoto é o fósforo a partir de uma perspectiva ambiental. Ele apresenta limitação nas reservas globais e possui crescente tendência de quebra do seu ciclo natural, logo sua reciclagem possui importância (BALMER, 2004 *apud* MARZOCHI, 2008).

A reciclagem agrícola do lodo tem beneficio de transformar o resíduo em insumo agrícola, fornecendo matéria organiza e nutrientes ao solo. Suas vantagens são: reduzir efeitos adversos a saúde e meio ambiente causado por alternativas como incineração, diminuir dependência de fertilizantes químicos e melhorar as condições para o balanço do CO_2 pelo incremento da matéria orgânica no solo (OUTWATER, 1994 *apud* ANDREOLI 1998).

Andreoli et al. (1998) dizem que a aplicação do lodo em áreas agrícolas traz benefícios as propriedades físicas do solo, como estado de agregação das partículas, incrementando a capacidade de infiltração e retenção de água e aeração. A decomposição do lodo gera agentes complexantes que facilitam solubilização de fosfatos combinados no solo a ferro e alumínio, bem como nutrientes em compostos orgânicos de liberação lenta (CARVALHO; BARRAL, 1981 *apud* ANDREOLI et al. 1998).

Para solos tipicamente ácidos, a reciclagem agrícola dos lodos de esgoto combinado ao método de calagem é benéfico atuando como corretor de pH do solo e eliminação de patogênicos no lodo (ANDREOLI, et al., 1998).

Os riscos do uso de lodo como fonte de matéria orgânica e nutriente estão relacionados, principalmente, ao conteúdo de metais pesados e microrganismos patogênicos (ANDREOLI, 1998).

Elementos traço, tais como arsênio, cádmio, cobre, cromo, mercúrio, níquel, entre outros, podem estar presentes no lodo e tem disponibilidade por reações de adsorção, complexação, precipitação, oxidação e redução (ANDREOLI et al., 1998).

Entre os microrganismos patógenos, são particularmente importantes o estreptococos, *Salmonella sp*., *Shigella sp*., helmintos (larvas e ovos), protozoários (cistos) e vírus (enterovirus e rotavirus) (ANDREOLI et al., 1998).

A matéria orgânica do lodo sobre mineralização, liberando nitrogênio na forma amoniacal e nítrica, que não é somado ao existente antes da aplicação. Assim, a quantidade de lodo aplicada deve ser tal que essa não exceda o que a planta vai consumir, pois o excedente ficaria em forma lixiviável e poderia alcançar e contaminar corpos de água subterrâneos. O fósforo não apresenta tanto risco devido à deficiência no solo e a grande retenção pelas plantas (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

De maneira geral, as doses de *lodo de esgoto* recomendadas nos plantios florestais variam de 20 a 60 t./ha em base seca, contudo devem ser observadas as lixiviações, especialmente do nitrogênio, fósforo e metais pesados para evitar danos ao meio ambiente (NETO et al., 2007).

Chueiri et al (2007) notaram que os teores de K, N, Mg, Cu e Zn no tecido vegetal do trigo foram aumentados pelo lodo, enquanto o fertilizante mineral os reduziu, indicando o efeito de concentração e diluição, respectivamente.

2.5. CULTURA DO EUCALIPTO

Segundo a Higa et al. (2000), o gênero Eucalyptus possui mais de 600 espécies que estão adaptadas a diferentes climas e solos. Elas tem diversas finalidades, entre elas, ornamental, decorativa, alimentícia e o mais comum, aproveitamento da madeira como lenha, cercas, construções rurais, madeira cerrada, papel e celulose.

O eucalipto foi introduzido no Brasil em 1904. O objetivo era suprir a necessidade de lenha, postes e dormentes das estradas de ferro. Em 1950, seu uso se estendeu como matéria-prima das fábricas de papel e celulose. Teve grande crescimento durante o período de incentivos fiscais nas décadas de 60, 70 e 80 (MOTTA et al., 2010).

Em todo o Brasil, o eucalipto teve uma ótima adaptação quando plantado em escala comercial na forma de monocultura. Aplicando espaçamento e correção de solo adequado, é possível alcançar bons índices de produtividade. Visto que o clima favorece o seu desenvolvimento, pode-se obter grandes volumes com qualidade em um curto espaço de tempo (CHAUL; TIBIRICA, 2006).

As espécies florestais apresentam diferenças de absorção, translocação, acumulo e uso de nutrientes, que influenciam em seu crescimento. Estas diferenças ocorrem entre espécies, procedências e clones (GODOY; ROSADO, 2011).

Para plantio, deve-se selecionar a espécie que melhor se adapte as condições do ambiente e a partir de alguns fatores, como exigências de clima e solo, finalidade de plantio, tempo de rotação da cultura, produtividade, custo, disponibilidade de sementes e mudas, qualidade do produto, versatilidade da produção, resistência a pragas, entre outros (WELCKEN et al., 2008).

Para região central do Brasil, as espécies de eucalipto mais utilizadas em reflorestamento são: E. grandis, E. urophylla, C. citriodora, E. cloeziana e E. camaldulensis (MOURA; GUIMARAES, 2003). A Tabela 2.1 apresenta diferenças entre as espécies mais utilizadas na região central do Brasil.

Tabela 2.1: Comparação entre espécies de eucalipto mais utilizadas na região central do Brasil.

Características	E. grandis	E. urophylla	C. citriodora	E. cloeziana	E. camaldulensis
Produtividade (m^3/ha/ano)	20-30	20-25	10-15	15-20	10-15
Exigência Nutricional	Alta	Média	Alta	Média	Baixa
Forma do tronco	Reta	Reta	Reta	Reta	Tortuosa
Densidade da madeira	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Média
Rebrota	Baixa	Alta	Média	Média	Alta
Formação de mudas	Fácil	Fácil	Média	Difícil	Fácil
Crescimento inicial	Rápido	Rápido	Baixo	Baixo	Médio
Pragas e doenças	Alto	Alto	Médio	Médio	Baixo

Fonte: Moura; Guimarães (2003)

Segundo Wilcken et al. (2008), a muda ideal de eucalipto deve ter idade de até 90 a 100 dias no viveiro, ter entre 15 a 25 cm de altura e ter sido produzida em tubetes, com substrato próprio. Mudas feitas em sacos plásticos tem maiores chances de terem raízes “enoveladas”, e mudas feitas com o solo podem trazer doenças, que poderão causar problemas no campo.

O espaçamento das mudas depende principalmente da fertilidade do solo e regime de chuvas. Recomenda-se espaçamentos menores, padrão 3,0 m x 2,0 m, em regiões com período seco inferior a 60 dias, enquanto mais abertos, padrão 3,0 x 2,5 m ou 3,0 x 3,0 m, para regiões com seca acima de 60 dias (WILCKEN et al., 2008).

A maior parte dos nutrientes consumidos pela planta é responsabilidade da ciclagem de nutrientes. Segundo Raij et al. (1997 *apud* AFAZ, 2016), o fluxo de nutrientes aumenta consideravelmente no momento em que a planta começa a perder suas folhas devido a limitação de luminosidade. Grande parte dos nutrientes depositam-se nas folhas, galhos e outras partes vegetais, e quando caem, entram em decomposição, liberando esses para as árvores, assim disponibilizando os nutrientes necessários para metabolismo da planta.

O fósforo é o principal nutriente que confere caráter distinto as espécies de eucalipto em relação ao crescimento e eficiência nutricional (FURTINI NETO, 1994 *apud* AFAZ, 2016).

Segundo Lira et al. (2008), o carbono e nitrogênio são os dois principais nutrientes que constituem a biomassa das árvores. O carbono é absorvido diretamente da atmosfera durante o processo fotossintético e o nitrogênio é absorvido principalmente do solo através do sistema radicular.

A adubação de plantio tem objetivo principal de fornecer fósforo, cobre e zinco, e, para solos com baixo teor de matéria orgânica e potássio, doses de nitrogênio e potássio. Sugere-se a aplicação de nitrogênio e potássio de acordo com as tabelas 2.2 e 2.3. Os adubos devem ser colocados em sulco ou em cova de plantio (SILVEIRA et al., 2001).

Tabela 2.2: Doses recomendadas de nitrogênio para florestamento de eucalipto

Teor	Matéria orgânica ($g.dm^{-3}$)		
	0 – 15	16-40	➢ 40
N (kg/ha)	60	40	20

Fonte: Gonçalves (1995)

Tabela 2.3: Doses recomendadas de potássio para florestamento de eucalipto

Teor de argila (%)	Teor de K por resina ($mg.100cm^{-3}$)		
	0 – 0,7	0,8 – 1,5	>1,5
	----------K2O ($kg.ha^{-1}$)----------		
< 15	50	30	0
`15 - 35	60	40	0
> 35	80	50	0

Fonte: Gonçalves (1995)

As tabelas 2.4 e 2.5 indicam a recomendação de dose de Zinco, Cobre e fósforo a partir de dados do solo.

Tabela 2.4: Recomendação de zinco e cobre para Eucalipto de acordo com o disponível no solo

Teor	Disponível no solo ($mg.dm^{-3}$)		Doses Recomendadas ($kg.ha^{-1}$)	
	Zn - EDTA	Cu- EDTA	Zn	Cu
Muito baixo	< 0,25	< 0,3	2	1
Baixo	0,25 - 0,5	0,3 - 0,5	1	0,5
Adequado	0,5 - 1	0,5 - 0,8	0,5	0
Acima do adequado	> 1,0	> 0,8	0	0

Fonte: Silveira et al. (1998b) apud Silveira et al. (2001)

Tabela 2.5: Recomendação de fósforo para Eucalipto de acordo com o teor de argila e de fósforo disponível no solo

Teor de argila (%)	Teor de P por resina ($mg.dm^{-3}$)			
	0 - 2	3 – 5	6-8	> 8
	----------P_2O_5 ($kg.ha^{-1}$)----------			
< 15	60	40	20	0
`15 - 35	90	70	50	20
> 35	120	100	60	30

Fonte: Gonçalves (1995)

Segundo Gonçalves (1995), pelo eucalipto ser considerado espécie de rápido crescimento, com ciclos de corte de até 10 anos, a adubação de cobertura, a qual ocorre após a adubação de plantio, pode ser parcelada, equitativamente, parte entre 3 a 6 meses pós-plantio, parte entre 6 a 12 meses pós plantio, e o restante entre 12 a 24 meses pós plantio.

Segundo Higa et al. (2000), a quantidade adubo depende do tipo e nível de fertilidade do solo, mas de modo geral se aplica, por muda, de 25 a 50 g de nitrogênio, tendo menores dosagens para maiores teores de matéria orgânica no solo, de 50 a 100 g de fósforo, tendo maiores teores para solos mais argilosos, e 20 a 40g de potássio, conforme teor do elemento no solo. Além disso, se aplica cerca de 30g de micronutrientes, principalmente boro e zinco, por muda de eucalipto.

O plantio pode ser sem irrigação (período de chuvas), com irrigação (período de secas) ou com gel hidrorretentor. Para plantio irrigado, é necessária a aplicação de 2 a 4 L de água por muda, em duas a quatro irrigações, sendo a primeira após o plantio e as outras uma vez por semana até 30 dias (WILCKEN et al., 2008).

Soares (2003 *apud* NETO et al. 2007*)* realizou um experimento aplicando superficialmente doses de 10, 20 e 40 t./ha de lodo *de esgoto* suplementado com P e K em cultivo de Eucalyptus grandis. Observou que o crescimento em altura e diâmetro na dose de 20 t./ha superou a fertilização mineral.

Garcia et al. (2009) avaliaram a aplicabilidade e efeito na nutrição mineral do lodo de esgoto sobre o Eucalyptus grandis a partir de 5 doses, 0, 25, 50, 75 e 100 t./ha. O aumento das doses proporcionou o aumento dos teores foliares de N, P, K, Zn e Cu.

Silva et al. (2008) fizeram aplicação de lodo de esgoto complementado com potássio e boro em uma área ocupada com Eucalyptus grandis. Foi observado significativo aumento do volume de madeira em relação as testemunhas que não receberam o lodo. As doses recomendadas variam de 5 a 10 t./ha, podendo substituir adubações nitrogenadas e fosfatadas.

Lira et al. (2008) realizaram experimento de em área de Latossolo Vermelho-Amarelo e vegetação natural cerrado. Foram avaliados cinco tratamentos, sendo eles, testemunha absoluta, adubação mineral, 10 t.ha-1, 20 t.ha-1 e 40 t.ha-1. Foi concluído que a aplicação do resíduo incrementa o desenvolvimento do eucalipto e propicia aumentos no acumulo de biomassa epigea, assim como nos estoques de C e N nessa biomassa aérea das arvores.

Rocha et al. (2004) avaliaram a fertilidade do solo, estado nutricional e o crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* com lodo de esgoto. Seus resultados mostraram que a aplicação do biossolido influenciou positivamente na nutrição das plantas, proporcionando

produção de madeira semelhante a obtida nas plantas que receberam tratamento mineral, quando a dose foi de 12 t.ha-1.

Rocha et al. (2004) avaliaram a fertilidade do solo, estado nutricional e o crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* com lodo de esgoto. Seus resultados mostraram que a aplicação do biossolido influenciou positivamente na nutrição das plantas, proporcionando produção de madeira semelhante a obtida nas plantas que receberam tratamento mineral.

Silva (2008) realizou estudo com tratamentos de 10, 20 e 30 t. ha-1 de lodo de esgoto úmido e seco, o branco e adubo mineral. Dezoito meses após a implantação, concluiu que o uso do lodo de esgoto permite a substituição das adubações nitrogenada e fosfatada, além da adição de micronutrientes.

Firme (2009) avaliou os efeitos de 4 doses de lodo de esgoto e de 4 doses de adubos nitrogenados e fosfatados sobre a produção de matéria seca e produtividade de madeira após 43 meses do plantio. Ele notou que a aplicação do lodo, dentro dos critérios estabelecidos por norma não resulta em contaminação do meio ambiente, e que a dose de 50% do recomendado de lodo pelo critério de Nitrogenio possibilita reduzir o uso de fertilizantes nitrogenados e fosfatados em 100% e 66%, respectivamente.

Trigueiro (2002) comparou as quantidades de adubo utilizadas para produção de mudas de eucalipto e pinus. Obteve-se uma economia de fertilizantes de 64% para o eucalipto e 12,5% para o pinus quando as mudas foram produzidas com biossólidos.

2.6. LEGISLACÃO DE APLICACÃO AGRÍCOLA DE LODOS DE ESGOTOS E INDUSTRIAIS

Considerando que o lodo de esgoto é fonte potencial de riscos a saúde pública e meio ambiente, a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 375, de 29 de agosto de 2006 estabelece critérios e procedimentos, para o uso em área agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

A norma técnica CETESB P4.230 de 1999 estabelece os procedimentos, critérios e requisitos para projeto e operação de aplicação de lodos de sistema de tratamento biológico em áreas agrícolas. A norma é utilizada neste trabalho visto que se aplica a lodos industriais.

Os parâmetros de caracterização de lodo exigido pela norma CETESB P4.230 para aplicação agrícola são: Carbono orgânico, fósforo, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, nitrogênio total, pH, potássio, sódio, umidade, número mais provável de coliformes fecais e Salmonella sp., arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo total, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio, zinco e sólidos voláteis.

Os critérios quanto a composição para aplicação agrícola são referentes a concentrações limites de metais no lodo, persistência de matéria orgânica, tratamento do lodo e patogênicos.

Conforme a referida norma da CETESB, os critérios de localização da aplicação agrícola de lodo de esgoto são:

a) Declividade da área não deve ultrapassar 10% para aplicação superficial sem incorporação, 15% para aplicação superficial com incorporação e 18% para aplicação subsuperficial;

b) Devem ser mantidas zonas de proteção de modo a não causar incomodo a vizinhança;

c) Devem ser mantidas distâncias de 15 metros de vias públicas e 10 metros de drenos interceptores e divisores de águas superficiais.

Os critérios de operação são referentes à estocagem, a qual deve ser isento de líquidos livres, a menos que tenha piso impermeabilizado, registros e relatórios, contendo dados de origem, caracterização, data de aplicação, localização, entre outros, documentos de controle do tratamento e aplicação, responsabilidades operacionais e monitoramento.

O monitoramento do solo deve ser anual ou antes de uma nova aplicação. A tabela 2.6 apresenta os parâmetros monitorados.

Tabela 2.6: Monitoramento do solo de locais com aplicação agrícola de lodo de esgoto

Parâmetro	Frequência
Análise de fertilidade	Anual
Condutividade	
Indicador (a ser definido caso a caso)	
Metais	A cada 5 anos ou anual

Fonte: CETESB P4.230

O monitoramento dos metais deve ser realizado anualmente sempre que estes forem considerados poluentes limitantes da taxa de aplicação ou a partir da data em que a taxa acumulada teórica alcançar 80% da máxima permissível.

O monitoramento do lodo é baseado na quantidade de lodo aplicado em base seca. A tabela 2.7 apresenta a frequência de monitoramento do lodo. Os parâmetros analisados são metais, patógenos e nutrientes agronômicos limitantes.

Tabela 2.7: Frequência de monitoramento de lodo

Quantidade de lodo destinado para aplicação na agricultura (t./ano)	Frequência
< 1.500	Uma amostra composta a cada trimestre
> ou = 1.500	Uma amostra composta a cada 60 dias

Fonte: CETESB P4.230

Os lodos contendo metais pesados em concentrações acima dos limites estabelecidos pela norma CETESB P4.230, não são aceitáveis para aplicação em solo agrícola. A Tabela 2.8 apresenta os valores limites.

Tabela 2.8: Concentração máxima de metais permitida para aplicação de lodos em solos agrícolas

Metal	**Concentração máxima em base seca (mg/kg) P4.230**
Arsênio	75
Cádmio	85
Cobre	4.300
Chumbo	840
Mercúrio	57
Molibdenio	75
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	7.500

Fonte: CETESB P4.230

O lodo de esgoto pode ser classificado como classe A e B dependendo da concentração de agentes patogênicos. Pela P4.230, lodo classe A é aquele que o processo de redução de patógenos é aprovado pelo órgão de controle ambiental como capaz de produzir tal efeito e se apresenta na faixa de densidade dos organismos, enquanto o classe B pode possuir

tratamento aceito pelo órgão ou apresenta outra faixa de densidade de organismos. Não é aceita aplicação agrícola de lodos que ultrapassem os limites da Classe B. A tabela 2.9 apresenta valores para essa classificação de acordo com a norma citada.

Tabela 2.9: Critério de classificação de densidade de microrganismos para aplicação agrícola

Classificação	Coliformes fecais (NMP/g ST)	Salmonella SP (NMP/4g ST)
A	$<10^3$	<3
B	$<2x10^6$	-

Fonte: CETESB P4.230

A tabela 2.10, apresentado na CETESB P4.230, apresenta a carga acumulada máxima de substancias inorgânicas presentes em lodos aplicados em solos agrícolas.

Tabela 2.10: Carga acumulada máxima de substâncias inorgânicas presentes em lodos aplicados em solos agrícolas

Substancia inorgânica	Carga acumulada permitida (kg/ha)
Arsênio	41
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1.500
Mercúrio	17
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2.800

Fonte: Adaptado de CETESB P4.230

2.7. FERTILIZANTES MINERAIS

Segundo a Internacional Fertilizer Industry Association (2000), os fertilizantes minerais são materiais que possuem os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Seu uso eficiente contribui para o aumento da produtividade agrícola.

A cadeia produtiva dos fertilizantes possui quatro etapas, sendo elas (MME, 2008):

- Matéria-prima básica;

Ex: Enxofre, rocha fosfática, rochas potássicas, gás natural, gás residual, Nafta, resíduos asfáltico etc.

- Matéria-prima intermediária

Ex: Amônia, Acido nítrico, Acido Sulfúrico, Acido Fosfórico etc.

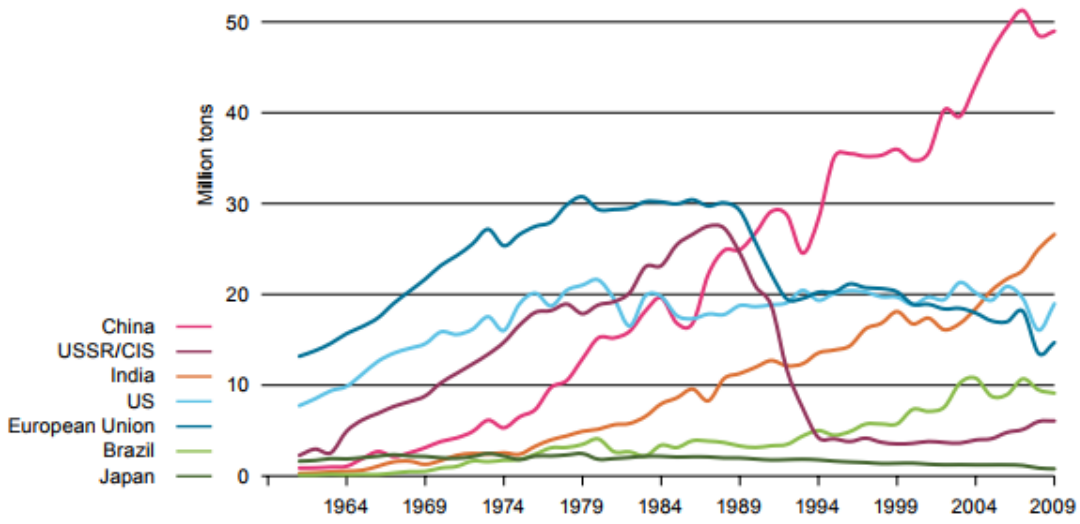
- Fertilizantes básicos; e

Ex: Nitrato de Amônio, Ureia, Sulfato de Amônio, Monoamônio fosfato, Diamônio fosfato, Superfosfato triplo, Superfosfato simples, cloreto de potássio etc.

- Mistura e Granulação

Por mais de 150 anos, ele está presente na agricultura mundial, contribuindo para atender as demandas de uma população crescente. Os fertilizantes minerais são responsáveis por um terço da produção agrícola (IFA, 2000). Podemos ver o perfil de consumo ao longo dos anos pela figura 2.1:

Figura 2.1: Consumo de Fertilizantes Minerais (NPK)



Fonte: IFADATA 2012 / WWF 2013

Os fertilizantes são utilizados para suplementar a disponibilidade de nutrientes do solo, compensar a perda de nutrientes decorrentes da remoção de culturas, e melhorar as condições não favoráveis ou manter boas condições para as plantas (IFA, 2000).

A IFA (2000) recomenda que o uso de fertilizantes precisa se ajustar as condições agroclimáticas e ambientais, e administração. Essas condições incluem as características do solo, práticas de cultivo, qualidade e quantidade da água de irrigação, lençol freático, rotações de cultura e capacidade administrativas do agricultor.

Segundo WWF (2013), o nitrogênio sintético apresenta impactos negativos não apenas ao meio ambiente, mas também a agricultura. A maioria dos fertilizantes nitrogenados causa acidificação do solo, esgotamento do húmus do solo e emissão de gases estufa.

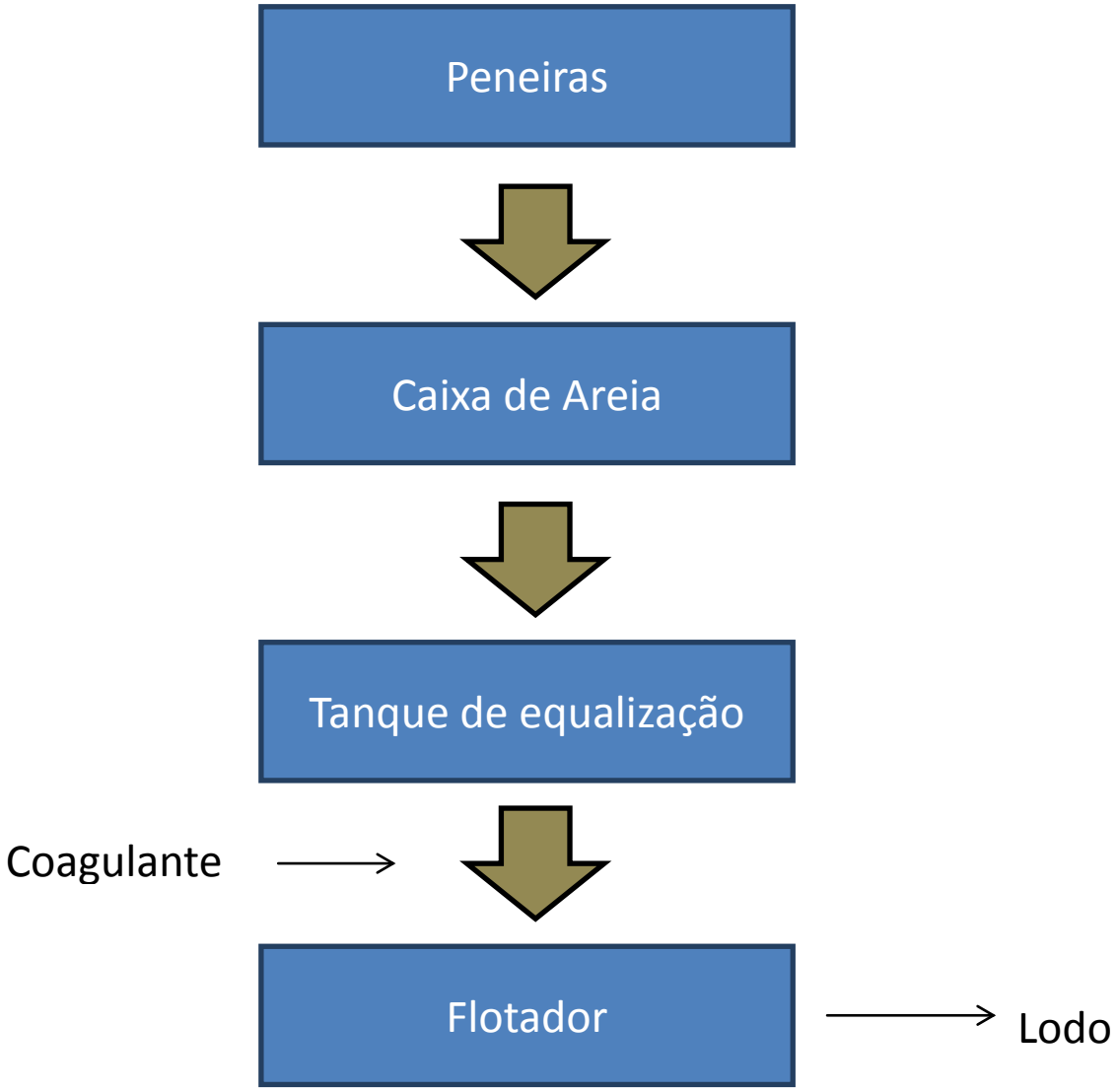
A agricultura é responsável por 12% das emissões de gases de efeito estufa, o que pode colocar como um dos responsáveis pela mudança climática. Desse montante, 47% é causado pelo desmatamento e queimadas, e 17% é atribuído a lançamento de oxido nítrico, resultado da fertilização mineral. Sendo que não estão contabilizadas as emissões geradas no processo de produção dos fertilizantes.

3. METODOLOGIA

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA ESTUDADA

O lodo do estudo é proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes de uma indústria de atomatados de grande porte, localizada no município de Goiânia. A indústria gera, em média, 100 m^3/h de efluentes na entressafra e 350 m^3/h na safra. Essa diferença se dá pela inclusão de etapas no processo produtivo que não existe no período de entressafra. As etapas do processo de tratamento até a geração de lodo são apresentadas na Figura 3.1.

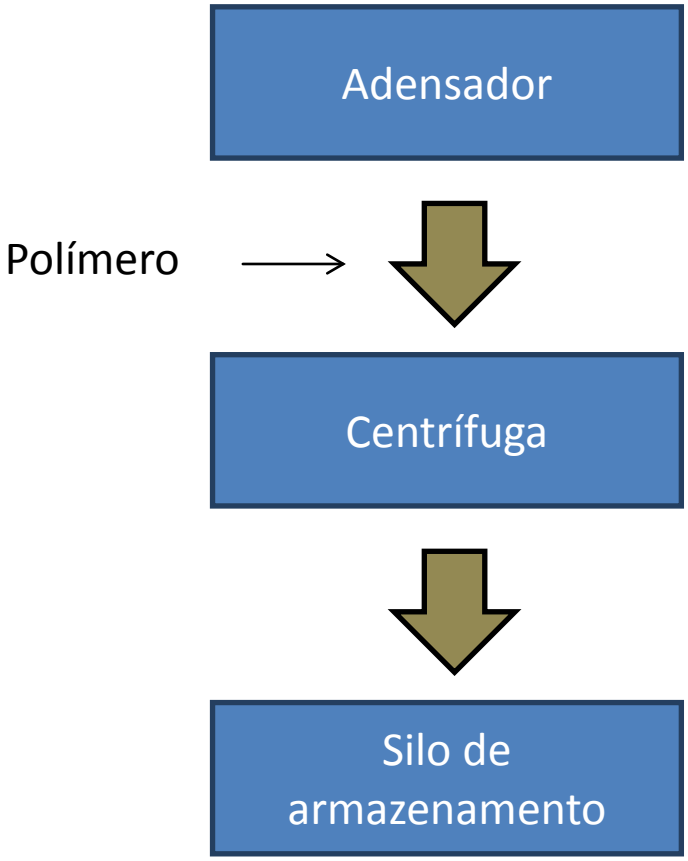
Figura 3.1: Etapas do processo de tratamento de efluentes da indústria até ponto de geração do lodo do experimento



Fonte: Autor

Atualmente, o lodo gerado na empresa é tratado *in loco* conforme indicado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Tratamento utilizado para o lodo na indústria estudada



Fonte: Autor

O lodo chega ter 5% de sólidos no adensador, mas recebe polímero para auxiliar o desaguamento efetuado pelas centrífugas. O lodo sai da centrífuga para uma baia metálica, apresentado na Figura 3.3, com teor de sólidos de 22,6%, em média, e é bombeado para o silo de armazenamento.

Figura 3.3: Centrífuga e baia metálica circulada em vermelho

Fonte: Autor

A quantificação da geração de lodo ao longo do ano de 2016 foi realizada a partir dos Manifestos de Transporte de Resíduos gerados. O método utilizado pelos operadores de quantificação do lodo para preenchimento do Manifesto de Transporte foi a diferença de peso do veículo na entrada e saída da ETE.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LODO INDUSTRIAL ESTUDADO

3.2.1 Amostragem

Foi utilizado o lodo desaguado presente na baia metálica para realização do presente estudo. Em concordância com a NBR 10.007 da ABNT, o qual apresenta os requisitos de amostragem de resíduos sólidos, a baia metálica foi considerada como “Tambor ou contêiner com abertura

na parte superior" e foi retirada uma amostra através abertura. Não foram necessárias outras amostras para representar as variações do perfil devido profundidade da baia ser inferior a 1,5 metros. Amostras por toda seção vertical seriam necessárias se a coleta fosse realizada em sacos e similares, barris, montes e pilhas. No caso de lagoas, tanques abertos e caminhões tanques são necessárias amostras no perfil horizontal dividido em quadrículos para representar as variações do perfil.

A amostra foi acondicionada em material inerte e armazenada em uma caixa de isopor com gelo até chegar ao laboratório. Além disso, foram utilizados os EPI necessários, tais como máscara, luva, óculos, bota, protetor auricular e capacete.

3.2.2. Parâmetros utilizados na caracterização do lodo

A caracterização do lodo para aplicação agrícola contemplou parâmetros requeridos pelas normas da CETESB P4.230 de 1999, que apresenta os requisitos de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas. Os parâmetros analisados em base seca foram: Carbono orgânico, fósforo, nitrogênio total, pH, potássio, sódio, umidade, cádmio, chumbo, cobre, cromo total, níquel, selênio, zinco e Molibdênio.

Arsênio e Mercúrio não foram caracterizados em base seca, mas as concentrações presentes no lixiviado e solubilizado, segundo ensaios realizados conforme NBR 10005 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, utilizando absorção atômica foram constatados valores menores que os limites pertencentes na NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos.

As análises de lixiviado e solubilizado foram realizadas em julho de 2016 e apresentam 95 parâmetros, entre eles cianetos, fenóis, benzeno etc., As metodologias utilizadas nas análises foram NBR 10005, absorção atômica, espectrometria, cromatografia e potenciometria.

3.3 LEGALIDADE DA APLICACÃO AGRÍCOLA

A análise da legalidade da aplicação agrícola do lodo foi realizada através da comparação dos limites de concentração de metais e microrganismos estabelecidos na norma CETESB P4.230, presentes nas tabelas 2.8 e 2.9, respectivamente, e os resultados das análises laboratoriais.

3.4. ESTIMATIVA DA TAXA DE LODO INDUSTRIAL PARA O CRESCIMENTO DE EUCALIPTO

3.4.1. Substrato agrícola

A caracterização do substrato agrícola antes do cultivo é importante no cálculo da taxa de aplicação do lodo e fertilizante mineral, pois pode apresentar diferentes taxas de nutrientes. Não foi considerado o substrato no presente trabalho, logo suas características nutricionais foram ignoradas para cálculo da taxa de aplicação do lodo.

O cálculo da taxa de aplicação de fósforo e potássio exige o conhecimento da taxa de argila, a qual foi considerada 34,83% conforme encontrado por um experimento em Goiânia realizado por Araujo et al (2016).

3.4.2. Estimativa da taxa de aplicação de lodo para cada nutriente

As taxas de aplicação de lodo em kg por hectare para nitrogênio, fósforo, potássio, zinco e cobre foram estimadas pela equação 1. O cálculo utilizou as doses recomendadas para plantio presentes nas tabelas 2.2, 2.3 e 2.4 e a concentração de cada nutriente presente no lodo de efluentes.

$$Taxa\ de\ aplicacao\ de\ lodo\ \left(\frac{\text{kg lodo}}{\text{ha}}\right) = \frac{\text{Dose recomendada}\left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right)}{\text{Concentracão}\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg lodo}}\right)} \qquad (1)$$

3.4.3. Estimativa da taxa máxima de aplicação de lodo

Para cálculo das taxas máximas de aplicação de lodo, foram utilizadas as metodologias presentes na norma CETESB P4.230.

3.4.3.1 Nitrogênio

A aplicação de nitrogênio, em toneladas por hectare, não deve exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura (kg/ha) e o teor de nitrogênio disponível no lodo (kg/t.), conforme apresentado na equação 2.

$$Taxa\ máxima\ de\ aplicacao\ N\ \left(\frac{kg}{ha}\right) = \frac{\text{N recomendado}\left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right)}{\text{N disp}\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg.}}\right)} \quad (2)$$

O teor de N disponível do lodo de esgoto, para aplicação subsuperficial, é calculado pela equação 3.

$$Ndisp\ \left(\frac{mg}{kg}\right) = \left(\frac{\text{FM}}{100}\right) * \left(N_{kj} - N_{NH3}\right) + \left(N_{NO3} + N_{NO2}\right) \quad (3)$$

Onde:

FM é a fração de mineralização do nitrogênio;

N_{kj} é Nitrogenio Kjeldahl (mg/kg);

N_{NH3} é Nitrogenio amoniacal (mg/kg);

N_{NO3} é Nitrato (mg/kg); e

N_{NO2} é Nitrito (mg/kg).

3.4.3.2. Substancias inorgânicas

As taxas de aplicação máxima dos metais pesados foram calculados pela equação 4 a partir dos valores presentes na Tabela 2.10, a qual apresenta a carga acumulada máxima quanto a aplicação de substâncias inorgânicas presentes no lodo em solos agrícolas, e a concentração dos metais no lodo.

$$Taxa\ máxima\ de\ aplicacao\ Metais\ \left(\frac{kg\ lodo}{ha}\right) = \frac{\text{Carga acumulada máxima}\left(\frac{\text{kg}}{\text{ha}}\right)}{\text{Concentracão}\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg lodo}}\right)} \quad (4)$$

3.4.4. Taxa de aplicação de lodo selecionada

A maior dose de lodo de efluente por parâmetro calculado no item 3.4.2. foi utilizada no experimento caso não ultrapasse as taxas máximas permitidas, calculadas no item 3.4.3.. Caso ultrapasse, foi selecionada a taxa que represente o limite permitido pela norma.

3.5. SELECÃO DO FERTILIZANTE MINERAL E SUA TAXA DE APLICACÃO

A empresa escolhida para seleção do fertilizante mineral está presente no mercado desde 1980 e originou em Anápolis/GO. Ela possui cinco plantas industriais e dezoito lojas no Centro-Oeste. Ela é uma das maiores distribuidoras de fertilizantes e produtos agropecuários do Centro-Oeste.

Foram selecionados os principais fertilizantes minerais, NPK, da empresa e um dos compostos mais vendidos, o 10-10-10.

Três taxas de aplicação foram calculadas proporcionalmente as doses de N, P e K presentes na taxa de aplicação do lodo, conforme equação 5.

$$Taxa\ de\ aplicacao\ Nutriente\ \left(\frac{\mathrm{kg}}{ha}\right) = \frac{\text{Taxa de aplicacão de lodo}\left(\frac{\mathrm{kg}}{ha}\right)}{\frac{\text{C FM}}{\text{C lodo}}} \quad (5)$$

Onde,

C FM é a concentração do elemento no fertilizante mineral (g/kg); e

C lodo é a concentração do elemento no lodo (g/kg).

As taxas de aplicação foram utilizadas para a análise financeira.

3.6. COMPARACÃO DE CUSTO

Para estimativa da economia financeira da aplicação do lodo gerado em 2016 pela Estação de Tratamento de Efluentes da indústria e a fertilização mineral, primeiramente, foi levantada a área necessária para realizar a disposição do lodo, conforme equação 6, a partir da taxa de aplicação de lodo selecionada no item 3.4.4..

$$Área\ (ha) = \frac{\text{Lodo gerado em 2016 (kg)}}{\text{Taxa de aplicacão lodo}\left(\frac{\mathrm{kg}}{ha}\right)} \quad (6)$$

Foi calculado o preço de cada fertilizante mineral a partir da sua taxa de aplicação, área e preço unitário, conforme equação 7.

$$Preco\ FM\ (R\$) = \text{Taxa de aplicacão FM } \left(\frac{\text{kg}}{ha}\right) * \text{Área (ha)} * \text{Preço unitário}\left(\frac{\text{R\$}}{kg}\right) \qquad (7)$$

O custo de aquisição do lodo foi considerado 0.

4. RESULTADOS

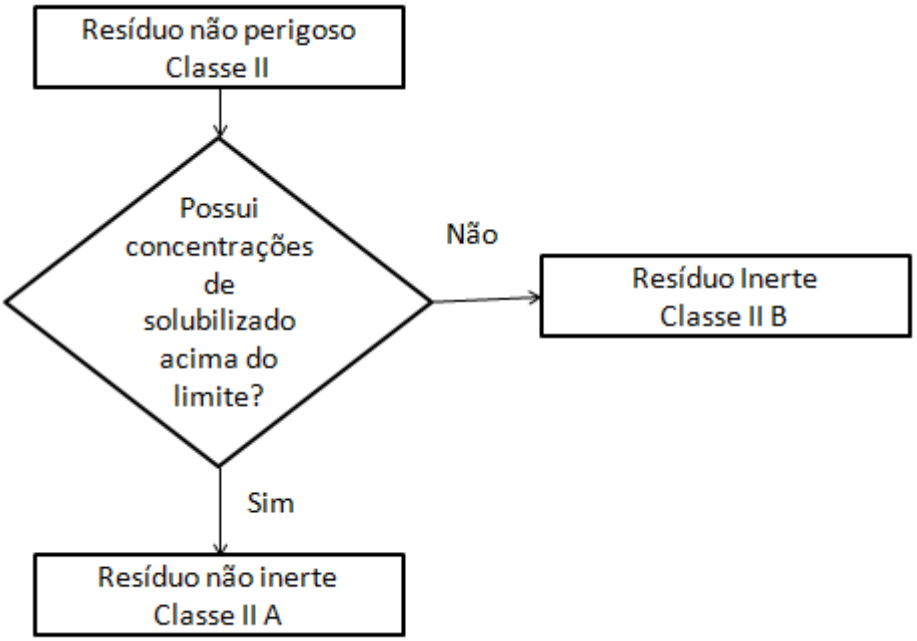
4.1. CARACTERIZACÃO DO LODO E APLICACÃO AGRÍCOLA

4.1.1. Metais pesados

As análises laboratoriais realizadas a base seca e as do solubilizado e lixiviado apresentam concentrações de todos os metais pesados abaixo do permitido pela norma CETESB P4.230 e NBR 10004:2004, com exceção do solubilizado de manganês e alumínio.

O lodo estudado é caracterizado como não perigoso por não apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Visto que apresentou dois metais fora dos limites da NBR 10004:2004, ele é classificado como Classe II A Não Inerte, conforme figura 4.1.

Figura 4.1 – Classificação de resíduos



Fonte: NBR 10004:2004

Os resultados das análises dos metais em base seca, conforme apresentados na tabela 4.1, não ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma CETESB P4.230. O Arsenio, Mercúrio e Selenio não foram caracterizados em base seca, mas apresentam concentrações no lixiviado e solubilizado abaixo dos limites estipulados pela NBR 10004:2004, visto na tabela 4.2.

Tabela 4.1: Caracterização do lodo estudado, confrontada com os valores máximos normatizados

Metal	**Concentrações presentes no lodo (mg/kg)**	**Concentração máxima em base seca, permitida pela normatização (mg/kg)**
Arsênio	-	75
Cádmio	0,60	85
Cobre	110	4.300
Chumbo	0,40	840
Mercúrio	-	57
Molibdenio	NR	75
Níquel	6	420
Selênio	-	100
Zinco	400	7.500

Fonte: Autor

Tabela 4.2: Concentrações de Arsênio, Selênio e Mercúrio presentes no lodo e limites da NBR 10004:2004

Metal	**Lixiviado (mg/L)**	**Limite Lixiviado (mg/L)**	**Solubilizado (mg/L)**	**Limite Solubilizado (mg/L)**
Arsênio	<0,05	1	< 0,01	0,01
Selênio	<0,05	1	<0,002	0,01
Mercúrio	< 0,0001	0,1	< 0,0001	0,0001

Fonte: Autor

Além dos dados anteriores, o efluente apresenta baixíssimos níveis de Arsênio e Mercúrio, visto que os processos da fábrica não utilizam esses metais.

4.1.2. Microorganismos

O lodo gerado na Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria é proveniente exclusivamente de águas residuárias industriais, visto que os efluentes sanitários não passam pelo processo físico químico. Logo, é classificado como Classe A e está dispensado do tratamento para redução de patógenos, segundo a norma CETESB P4.230. Além disso, segundo metodologia da ABNT NBR 10.004/2004, foi constatada ausência da presença de microrganismos e característica de patogenicidade.

4.2. TAXA DE APLICACÃO DE LODO

4.2.1. Taxa de aplicação de lodo para cada nutriente

A partir das características do lodo e das doses recomendadas para a aplicação no plantio de eucalipto, foram encontradas as taxas de aplicação para nutrientes apresentadas na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Taxas de aplicação por nutriente

Nutriente	Concentração no lodo (g/kg lodo)	Dose recomendada (kg/ha)	Taxa de aplicação (kg lodo/ha)
Nitrogênio	21,6	60	2.778
Fósforo	22	90	4.091
Potássio	5	60	12.000
Zinco	0,4	2	5.000
Cobre	0,11	1	9.091

As concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio no lodo se assemelham a alguns lodos de efluentes sanitários caracterizados, respectivamente, por Garcia (2009), 21,7, 5 e 6 g/kg, Lira et al (2008), 19, 9 e 2 g/kg, Rocha et al (2004), 26,6, 9,5 e 1,3 g/kg, Silva (2008), 32,7, 32,7 e 2.7 g/kg, e Firme (2009), 33, 8,1 e 1g/kg.

4.2.2. Taxas máximas de aplicação de lodo

As taxas máximas encontradas para aplicação do lodo, conforme norma CETESB P4.230 são apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4: Taxa máxima de aplicação de lodo pela concentração de nitrogênio

Nutriente	Concentração no lodo (mg/kg lodo)	Dose recomendada (kg/ha)	Taxa de aplicação (t/ha)
Nitrogênio	21600	60	2,778

Fonte: Autor

Tabela 4.5: Carga máxima acumulada de metais para aplicação agrícola de lodo

Metal	**Concentração (mg/kg lodo)**	**Carga máxima acumulada (kg/ha)**	**Taxa de aplicação (t/ha)**
Cádmio	0,6	39	65.000
Cobre	110,0	1500	13.636
Chumbo	0,4	300	750.000
Níquel	6,0	420	70.000
Zinco	400,0	2800	7.000

Fonte: Autor

As taxas de aplicação de lodo a partir da carga acumulada máxima de metais são bem mais altas que as taxas de aplicação encontradas conforme o sugerido para o cultivo de eucalipto, pois apresenta a concentração desses metais bem menores que a máxima permitida. O cádmio apresenta 0,7% da concentração permitida, enquanto que cobre, 2,6%, chumbo, 0,05%, níquel, 1,4% e Zinco 5,3%.

A taxa de aplicação de lodo a partir da taxa máxima de nitrogênio se assemelha com a taxa encontrada no item 4.2.2., pois a dose recomendada foi a mesma.

4.2.3. Taxas de aplicação de lodo

A maior taxa de aplicação de lodo encontrada de acordo com as doses recomendadas foi de 12 $t.ha^{-1}$ da necessidade de potássio (K_2O), o qual é um dos macronutrientes que apresenta melhor resposta a adubação observada em campo (REIJ et al, 1996). Entretanto, a taxa máxima permitida é de 2,778 t.ha-1, logo essa é a taxa selecionada.

A taxa está abaixa da recomendada pela literatura devido os estudos realizados na literatura não consideraram os limites estabelecidos pela norma.

4.3. TAXA DE APLICACÃO DE FERTILIZANTE MINERAL

Foram solicitadas informações sobre os fertilizantes específicos vendidos e compostos de nitrogênio, fósforo e potássio. As concentrações de cada nutriente nos fertilizantes específicos e a taxa de aplicação de cada um com base na concentração presente no lodo são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Taxa de aplicação de cada fertilizante mineral

Nutriente	Concentração no fertilizante mineral (g/kg)	Concentração no lodo (g/kg)	Taxa de aplicação (kg/ha)
Nitrogênio	450	21,6	133,4
Fósforo	210	22	291,2
Potássio	600	5	23,15

Fonte: Autor

Um dos fertilizantes minerais mais vendidos, segundo a empresa fornecedora, é o 10-10-10, o qual representa a porcentagem de NPK na composição do fertilizante. Para esse fertilizante, a tabela 4.7 mostra a taxa de aplicação para cada nutriente.

Tabela 4.7: Taxa de aplicação de cada fertilizante mineral composto

Nutriente	Concentração no fertilizante mineral (g/kg)	Concentração no lodo (g/kg)	Taxa de aplicação (kg/ha)
Nitrogênio	100	21,6	601
Fósforo	100	22	611
Potássio	100	5	138,9

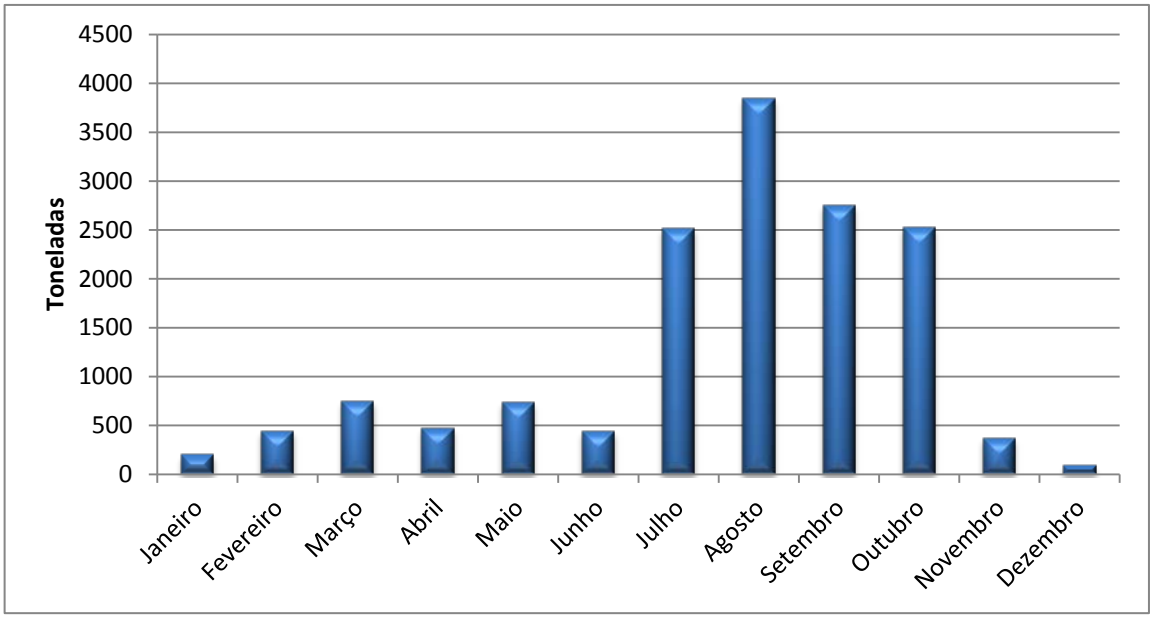
Fonte: Autor

A maior taxa de aplicação encontrada foi de 611 kg/ha, entretanto, o nitrogênio é limitante pela norma como visto no item 4.2.2., logo a taxa adotada foi de 601 kg/ha.

4.4. COMPARACÃO ECONOMICA

A ETE da indústria produziu um total de 15.128 toneladas de lodo desaguado no ano de 2016. O perfil da geração do ano é apresentado na figura 4.2.

Figura 4.2: Geração de lodo em 2016



Fonte: Autor

As variações dos meses entre novembro e junho são derivadas da geração de efluente ou de manobras operacionais, entre elas, direcionamento do efluente diretamente para o tratamento biológico, não gerando lodo, e o armazenamento no silo, não sendo contabilizado no mês.

Durante os meses de julho a outubro a indústria gera, em média, 250% a mais de efluentes devido o período da safra da matéria-prima. Essa diferença se dá pela inclusão de etapas no processo produtivo que não existe no período de entressafra. Além disso, o efluente apresenta alterações em sua composição, maior DQO, sólidos totais, entre outros.

A partir da somatória da geração de lodo no ano de 2016 e taxa de aplicação, a área calculada necessária para sua disposição na aplicação no cultivo de eucalipto da geração de lodo no ano foi de 5.446 ha.

A partir da área necessária, o custo de aquisição dos fertilizantes minerais é apresentado na tabela 4.8.

Tabela 4.8: Taxa de aplicação de cada fertilizante mineral composto

Fertilizante Mineral	Taxa de aplicação (kg/ha)	Custo unitário (kg)	Área (ha)	Custo total (R$)
Nitrogênio	133,4	2,04	5446	1.482.052
Fósforo	291,2	1,16	5446	1.839.615
Potássio	23,15	1,9	5446	239.452
Soma	-	-	-	3.561.119
10-10-10	601	1,52	5446	4.975.030

Fonte: Autor

A soma do custo de aquisição dos fertilizantes minerais específicos foi de 3.561.119, sendo o fósforo o mais oneroso por apresentar maior taxa de aplicação, devido menor concentração em sua composição no lodo.

Essa soma representa o custo de obtenção dos nutrientes (NPK) presentes no lodo, e o que apresenta de redução de custo se utilizado no cultivo de eucalipto.

O 10-10-10 apresentou custo maior visto que apresenta alta taxa de aplicação e custo unitário. O principal responsável por esse maior custo é o potássio, pois apresentou taxa de aplicação bem maior, 138,9 kg/ha, que se comprado separado, 23,15 kg/ha.

5. CONCLUSÃO

O lodo da indústria estudada é classificado como não perigoso não inerte, apresenta baixas concentrações de metais, não apresenta riscos microbiológicos e pode ser utilizado para aplicação agrícola no cultivo de eucalipto.

O lodo possui características semelhantes de NPK com lodos de estação de tratamento de esgotos sanitários e concentrações adequadas para aplicação agrícola. A taxa de aplicação encontrada nesse trabalho foi abaixo da recomendada pela literatura. Essa diferença se dá pelas taxas utilizadas nos experimentos não incluírem o limite permitido pela norma CETESB P4.230.

A economia de fertilizantes minerais pela presença de nutrientes no lodo é alta e pode ser levado em conta para o aproveitamento desse resíduo de forma sustentável.

6. REFERENCIAS

ABREU-HARBICH, L. V.; CHAVES, V. L.; Identificação do Ano Climático de Referencia para Goiânia – Goiás, In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo.

AFÁZ, D. C. S. Potencial do Fertilizante Orgânico Classe D no Cultivo Inicial de Eucalipto. Centro de Ciências Agrárias, UFSCar, Araras, 2016.

ANDREOLI, C. V.; DE LARA, A. I., FERREIRA, A. C.;BONNET, B. R. P., PEGORINI, B. R. P., A Gestão dos Biossólidos Gerados em Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico In. Engenharia e Construção, Curitiba, 1998, n. 24.

ANDREOLI, C. V., FERNANDES, F., SPERLING, M. Sludge Treatment and Disposal. Published by IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK, 2007, pg 1 -60.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007. Resíduos sólidos: amostragem, Rio de Janeiro, 2004c.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. Lodo de Esgoto - Impactos Ambientais na Agricultura. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, 2006.

BINOTTO, A. F. Relação Entre Variáveis de Crescimento e o Índice de Qualidade de Dickson Em Mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid e *Pinus elliottii* var. *elliotti* - Engelm. UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2007.

CASTRO, A. L. F. G.; SCALIZE, P. S.; SILVA, O. R. Cenário da Disposição do Logo de Esgoto: Uma Revisão das Publicações Ocorridas no Brasil de 2004 a 2014. Multi-Science Journal 2015, p.66-73, 2015.

CETESB, Companhia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 1999, Critérios para aplicação de biossólidos em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação, CETESB, São Paulo, 32p. Manual técnico, Norma P4.230.

CHAUL, T. N.; TIBIRICA, L. C. Viabilidade Econômica de Florestas de Eucalipto no Estado de Goiás. UCG, Goiânia, 2006.

CHUEIRI, W. A.; SERRAT, B. M.; BIELE, J.; FAVARETTO, N. Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 5, 2007.

CIIAGRO/IAC – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas/ Instituto Agronômico de Campinas.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, 17 mar. 2005.

COSTA, M. S. V.; JESUS, T. F.; GONÇALVES, R. N.; FRANCO, C. F.; BARRETTO, V. C. M. Manejo de Irrigação e Uso de Hidrogel no Desenvolvimento de Eucalipto. Anais do IX Seminário de Iniciação Científica, VI Jornada de Pesquisa e Pós-Graduação e Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, UEG, 19 a 21 de outubro de 2011.

FIRME, L. P. Produção de madeira e elementos potencialmente tóxicos no sistema solo-eucalipto tratado com lodo de esgoto. Tese (Doutorado em Ciência). Centro de energia nuclear na agricultura da USP, Piracicaba. p. 14.2009.

GODOY, T. G.; ROSADO, C. S. Efficiency of phosphorus use in young plants of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Revista Cerne, v. 17, n. 3, p. 303-308, 2011.

GONÇALVES, J.L. M. Recomendações de Adubação para Eucalyptus, Pinus e Espécies Típicas da Mata Atlântica. Documentos Florestais, v. 15. P 1-23. 1995.

HIGA, R. C. V.; HIGA, A. R.; MORA, A. L. Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural. Embrapa Florestas, Curitiba, PR, 2000.

IBGE. Pesquisa Mensal de Previsão e Acompanhamento das Safras Agrícolas no Ano Civil. Levant. Sistem. Prod. Agríc. Rio de Janeiro v.30, n.4, p. 1-84, abril.2017.

International Fertilizer Industry Association – IFA. O uso de Fertilizantes Minerais e o Meio Ambiente. p. 5-34. 2000.

LIRA, A. C. S; GUEDES, M. C.; SCHALCH, V. Reciclagem de Lodo de Esgoto em Plantação de Eucalipto: Carbono e Nitrogênio, Eng. sanit. ambient. Vol. 13 - N 2 - abr/jun 2008, 207-216.

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

MANZOCHI, C. I. S. Logística Para Tratamento e Disposição Final de Lodos de ETE's Visando Reciclagem Agrícola, UFSC, Florianópolis/SC, 2008.

MOURA, V. P. G.; GUIMARÃES, D. P. Produção de Mudas de *Eucalyptus* para o Estabelecimento de Plantios Florestais, Embrapa, Brasília, DF, novembro, 2003.

MOTTA, D.; DINIZ, E. N.; SILVA, W. F. Rentabilidade na Plantação do Eucalipto, VII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2010.

MAKISHIMA, N.; MELO, W. F.; Como Cultivar. Embrapa Hortaliças, 2005.

NETO, S. P. M.; JÚNIOR, C. H. A.; MURAOKA, T. Uso de Biossólido em Plantios Florestais. Embrapa Cerrados. Planaltina, DF, 2007.

PAREDES FILHO, M. V., Compostagem de lodo de esgoto para uso agrícola; Revista Agroambiental, dez, 2011, p. 73-80.

PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICKLER, A. C., LEAL, A. C., MILHOMEN, C. C., Produção e Tratamento de lodo de esgoto – uma revisão, Revista Liberato, v. 11, n. 16. p. 89-188, 2010.

PINHEIRO, R. M., Reciclagem de Lodo Primário da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel em Cerâmica Vermelha, UENF, Rio de Janeiro; 2008.

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

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONCALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; MOREIRA, R. M.; Crescimento de Eucalyptus grandis tratado com diferentes doses de esgoto úmido e seco, condicionados com polímero, Scientia Forestais, v. 36, p. 79-88, 2008.

SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; GONCALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de Eucalyptus grandis fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. Rev. Arvore. V. 32. n. 5. Pg 845-854, 2008.

SILVEIRA, G. E., Sistemas de Tratamento de Efluentes Industriais, UFRGS, Rio Grande do Sul, 2010.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; SGARBI, F.; MUNIZ, M. R. A.; Seja Doutor do seu Eucalipto, Informações Agronômicas, n. 93, p. 1-32, 2001.

TRIGUEIRO, R. M. Uso de biossólidos como substrato para produção de mudas de pinus e eucalipto. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu. Pg 63. 2002.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005.

VON SPERLING, M. Lagoas de estabilização. 2 ed., Belo Horizonte, EFMG/DESA, 2002.

WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; DIAS, T. K. R.; MASSON, M. V.; FILHO, P. J. F.; POGETTO, M. H. F. A. Guia Prático de Manejo de Plantações de Eucalipto, Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, UNESP, Botucatu-SP, 2008

KOTSCHI, J. A Soiled Reputation: Adverse Impactos of minerals fertilizers in tropical agricultura. WWF Germany. Heinrich Boll Stiftung. 2013.