



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Indiara Cardoso Guasti

Análise de Viabilidade Técnica e econômico-financeira da Compostagem
do lodo de Tratamento de Esgoto

Rio de Janeiro
2024



UFRJ

Indiara Cardoso Guasti

Análise de Viabilidade Técnica e Econômico-financeira
de Alternativas de Gerenciamento de Lodo de
Tratamento de Esgoto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadores: Caio de Teves Inácio e
Felipe Sombra dos Santos

Rio de Janeiro

2024

Guasti, Indiara Cardoso.

Análise de Viabilidade Técnica e econômico-financeira de alternativas de gerenciamento de lodo de Tratamento de Esgoto 2024 f:92 il. 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2024.

Orientadores: Caio de Teves Inácio e Felipe Sombra dos Santos

1. Saneamento. 2. Resíduo Orgânico. 3. Fertilizante Orgânico. 4. Reciclagem. I. Inácio, Caio de Teves e dos Santos, Felipe Sombra II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Análise de Viabilidade Técnica e econômico-financeira de alternativas de gerenciamento de lodo de Tratamento de Esgoto



UFRJ

Análise de Viabilidade Técnica e Econômico-financeira de alternativas de gerenciamento de lodo de Tratamento de Esgoto

Indiara Cardoso Guasti

Orientadores: Caio de Teves Inácio e Felipe Sombra dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Documento assinado digitalmente
gov.br CAIO DE TEVES INACIO
 Data: 15/03/2024 16:06:54-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

 Presidente, Prof. Caio de Teves Inácio, D.Sc., Embrapa Solos

Documento assinado digitalmente
gov.br FELIPE SOMBRA DOS SANTOS
 Data: 15/03/2024 16:13:04-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

 , Prof. Felipe Sombra dos Santos, D.Sc., UFRJ

 Profa. Mônica Pertel, D.Sc., UFRJ

Documento assinado digitalmente
gov.br MONICA PERTEL
 Data: 19/03/2024 14:04:49-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>
 Documento assinado digitalmente
gov.br SELMA GOMES FERREIRA LEITE
 Data: 20/03/2024 16:57:13-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

 Profa. Selma Gomes Ferreira Leite, D.Sc., UFRJ

 Prof. Daniel Vidal Pérez, D.Sc., Embrapa Solos

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL VIDAL PEREZ
 Data: 20/03/2024 15:06:32-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Rio de Janeiro
 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e a todos os
amigos que o saneamento me trouxe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de alcançar lugares e objetivos muito além do que eu poderia imaginar.

Aos meus pais por todo incentivo que sempre me deram aos estudos, cada um do seu jeito, sempre colocaram em minha frente um banquete ilimitado de oportunidades.

Aos meus professores Caio Teves, Felipe Sombra e Afonso Peres por todos os ensinamentos e por não me deixarem desistir, foram incansáveis em me apoiar e orientar, grandes mestres que pretendo honrar sempre.

E a cada um dos grandes amigos que acumulei ao longo dessa jornada no saneamento, por contribuírem de várias formas, pelo exemplo, pelo apoio técnico e moral, pelo aprendizado e por compartilharem dessa grande missão que é promover a universalização dos serviços de saneamento básico no Brasil.

RESUMO

Guasti, Indira Cardoso. **Análise de Viabilidade Técnica e econômico-financeira de alternativas de gerenciamento de lodo de tratamento de esgoto**. Rio de Janeiro, 2023. Dissertação (Mestrado) - Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Atualmente uma das tecnologias mais eficazes para tratar esgotos no Brasil é por lodos ativados que garante uma remoção de carga orgânica superior a 90%. Porém há a geração de um resíduo conhecido como lodo de esgotos na ordem de 0,227 kg de lodo por metro cúbico de esgoto tratado. Assim, o processamento e a destinação adequada de lodo são um dos grandes desafios das empresas de saneamento, chegando a atingir cerca de 60% dos custos operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgoto. Logo, faz-se necessário buscar soluções sustentáveis para destinação desse resíduo, nesse cenário, a compostagem pode representar uma saída técnica e economicamente viável para fechar o ciclo do saneamento. O composto produzido pode ser uma fonte de receita acessória ao setor de saneamento e uma fonte de economia e desenvolvimento para a agricultura urbana e periurbana. Neste trabalho provou-se que a aplicação de técnicas de compostagem para transformar lodo de esgoto em adubo orgânico é tecnicamente viável e eficaz para reduzir a concentração de patógenos presentes no lodo, tornando-o apropriado para aplicação na agricultura de acordo com as resoluções vigentes, além de representar uma economia no ordem de 80% nos custos com gerenciamento de lodo para as companhias de saneamento.

Palavras-chave: Saneamento; Compostagem; Fertilizante Orgânico; Reciclagem; Viabilidade Econômico-financeira.

ABSTRACT

Guasti, Indiara Cardoso. **Technical and economic-financial feasibility analysis of sewage treatment sludge management alternatives**. Rio de Janeiro, 2023. Dissertation (master's degree) - Environmental Engineering Program, Polytechnic School and School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Nowadays, one of the most effective technologies to treat sewage in Brazil is the Activated Sludge Process, which ensures organic load removal above 90%. However, this process generates a residue known as sewage sludge in the order of 0.227 kg of sludge per cubic meter of treated sewage. Thus, the processing and proper disposal of the sludge is one of the major challenges for sanitation companies, reaching around 60% of the Sewage Treatment Plant operating costs. Therefore, it is necessary to seek sustainable solutions for the disposal of this waste, in this scenario, composting can represent a technically and economically viable solution to close the sanitation cycle. The compost produced can be an ancillary source of income for the sanitation sector and a source of savings and development for urban and peri-urban agriculture. In this work it was proven that the application of composting techniques to transform sewage sludge into organic fertilizer is technically viable and effective in reducing the concentration of pathogens present in the sludge, making it suitable for application in agriculture in accordance with current resolutions, in addition to representing savings of around 80% in sludge management costs for sanitation companies.

Keywords: Sanitation; Composting; Organic Fertilizer; Recycling; Economic and Financial Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ensaio de Respirometria	57
Figura 2. Evolução de C-CO ₂ em função das diversas misturas de lodo de esgoto e poda de árvore em ensaio de respirometria	65
Figura 3. Erro padrão da média de CO ₂ acumulado em cada tratamento.....	66
Figura 4. Montagem das Pilhas.....	68
Figura 5. Monitoramento da Temperatura de Pilha 1	71
Figura 6. Monitoramento da Temperatura de Pilha 2	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de tratamento de esgoto mais empregados no Brasil	23
Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos tratamentos UASB x Lodos Ativados	26
Tabela 3. ANEXO V da IN SDA N° 7/2016 MAPA	42
Tabela 4. Diferenças entre a IN n° 25/2009 e a IN n° 61/2020	45
Tabela 5. Anexo VI Portaria Mapa n° 52/2021	47
Tabela 6. Limites máximos para <i>Escherichia coli</i> e organismos patogênicos	48
Tabela 7. Valores máximos de aporte de substâncias químicas de interesse, admissíveis no solo pela aplicação de lodo	49
Tabela 8. Demanda por adubo orgânico das principais culturas cultivadas no Brasil	50
Tabela 9. Tratamentos utilizados no ensaio de respirometria com a mistura de materiais lodo de esgoto e poda de árvore triturada	57
Tabela 10. Caracterização físico-química, química e microbiológica do lodo de esgoto	62
Tabela 11. Caracterização do lodo de esgoto quanto a presença de metais pesados	63
Tabela 12. Caracterização dos materiais estruturantes	64
Tabela 13. Parâmetros da equação de cinética de primeira ordem estimados a partir do ajuste dos dados de C-evoluído e taxa de degradação obtidos ao longo de 90 dias de condução do teste de respirometria (1)	65
Tabela 14. Caracterização das amostras componentes da mistura da pilha	69
Tabela 15. Monitoramento da Pilha 1 montada dia 14/06/2022 – 6,6 ton de lodo + 4,6 ton de poda- Relação C:N = 27	69
Tabela 16. Caracterização das amostras componentes da mistura da pilha 2	69
Tabela 17. Monitoramento da Pilha 2 montada dia 08/07/2022 – 10 ton de lodo + 5,6 ton de poda – relação C:N = 17:1	70
Tabela 18. Custo total com destinação em Aterro Sanitário, durante um período de 20 anos (Cenário I)	72
Tabela 19. Custo total com destinação em Centro de Compostagem, durante um período de 20 anos (Cenário II)	73
Tabela 20. Capex do processo de compostagem	74
Tabela 21. Opex da operação de compostagem durante 20 anos	75
Tabela 22. Dados financeiros e Valor Presente Líquido (12% a.a.), em reais, de três sistemas de destinação do lodo de esgoto produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto, em um período de 20 anos, para valores em reais (R\$)	75

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	57
Equação 2.....	61
Equação 3.....	61

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCON	Associação e Sindicato Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
ASSEMAE	Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento
C	Carbono
CADRI	Certificado de movimentação de resíduos de interesse
<i>Capex</i>	<i>Capital Expenditure</i>
CEMPRE	Compromisso Empresarial Para Reciclagem
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETEs	Estações de Tratamento de Esgotos
GEE	gases do efeito estufa, 39
HPA	hidrocarbonetos aromático policíclico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Instruções Normativas
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
N	Nitrogênio
NMP	Número Mais Provável
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
<i>Opex</i>	<i>Operational Expenditure</i>
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLANASA	Plano Nacional de Saneamento
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico, Plano Nacional de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos, Política Nacional de Resíduos Sólidos
REA	Revista de estudos ambientais
RSU	resíduos sólidos urbanos
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIPC	Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UASB	Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 O SANEAMENTO NO BRASIL.....	18
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL	21
3.3 TRATAMENTO DE ESGOTOS	22
3.4 LODO DE ESGOTO	27
3.4.1 Gerenciamento de lodo de ETE	28
3.4.2 Adensamento de lodo	29
3.4.3 Estabilização de lodo	29
3.4.4 Condicionamento do lodo.....	30
3.4.5. Desidratação de lodo	31
3.4.6. Destinação do lodo.....	32
3.5 MÉTODOS DE COMPOSTAGEM DE LODO.....	38
3.6 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA	41
3.7 DEMANDA POR FERTILIZANTES NO BRASIL.....	49
3.8 VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA	50
3.9 GREEN BONDS.....	52
3.10 Políticas Públicas.....	53
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	53
5. METODOLOGIA	54
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	54
5.2 ENSAIO PILOTO DE COMPOSTAGEM	59
5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA.....	59
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	62
6.2 ENSAIO PILOTO DE COMPOSTAGEM	68
6.3 VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA	71
7. CONCLUSÕES.....	76
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
9. REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A.....	97
OPEX DETALHADO: DISCRIMINAÇÃO DOS CUSTOS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM.....	97
APÊNDICE B.....	98
LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO	98

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios das empresas de saneamento é dar destino sustentável aos resíduos gerados durante as etapas dos processos de tratamento da água e do esgoto. Com o crescimento urbano acelerado, a produção de lodo, como é chamado o resíduo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), também aumenta, embora o lodo represente em média 1% a 2% do volume total do esgoto tratado, seu gerenciamento é complexo, e demanda custos elevados (ANDREOLI apud MAZIVIERO, 2011).

No ano de 2001, a estimativa de produção de lodo de esgotos no Brasil, foi na ordem de 150.000 toneladas de lodo seco (MACHADO, 2001). No entanto, com o aumento da cobertura de coleta e tratamento de esgotos no país, desde então essa produção vem aumentando. De acordo com Andreoli et al. (2008), em 2005 a produção de lodo de esgoto no Brasil foi de aproximadamente 362.000 toneladas. Já em 2015 foram tratados nas ETEs do Brasil 3.805.022 mil metros cúbicos de esgotos (SNIS, 2015). Levando-se em consideração que cada metro cúbico de esgoto bruto, possui em média 0,227 kg de sólidos secos totais (SANTOS, 2003), pode-se estimar que a produção de lodo de esgoto na base seca no ano de 2015, foi em torno de 863.740 toneladas, o que corresponde à um aumento de 238% na geração de lodo de esgoto em 10 anos (ABREU, 2017).

Embora tenha-se avançado no saneamento básico ao longo das décadas de 2000 e 2010, as taxas de coleta e tratamento de esgotos no Brasil em 2019, eram, 54,1% e 49,1%, respectivamente (SNIS, 2019), ainda baixas e muito aquém das metas estabelecidas no PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2014). Visando corrigir essa curva de cobertura, em julho de 2020 foi sancionado o novo Marco Legal do Saneamento Básico (LEI nº 14.026). O principal objetivo da legislação é universalizar e qualificar a prestação dos serviços no setor de saneamento. A meta da lei Nº 14.026 é alcançar a universalização até 2033, garantindo que 99% da população brasileira tenha acesso à água potável e 90% ao tratamento e a coleta de esgoto (BRASIL, 2020). Tendo em conta a população brasileira de 210.147.125 habitantes (IBGE, 2019), caso a cobertura de coleta e tratamento de esgotos em 2033 venha a atender 90% da população, como pretendido, a geração de lodo de esgoto será de

aproximadamente 2.028.252 toneladas de sólidos secos por ano, considerando que a população brasileira projetada para 2033 seja de 227.638.581 habitantes (IBGE, 2022).

Diante desse cenário de tendência de crescimento na cobertura da coleta e tratamento de esgotos nas próximas décadas, é imprescindível que o avanço no saneamento básico, venha acompanhado de alternativas factíveis e sustentáveis de disposição final do lodo de esgoto, visto que esse, sem o devido tratamento e estabilização pode ser prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente (BRASIL, 2006).

Atualmente, uma das técnicas mais eficazes para tratar efluentes domésticos é por “lodos ativados”. Segundo Von Sperling (1997) esse método chega a garantir uma eficiência superior a 90% na remoção de matéria orgânica, produzindo um efluente tratado clarificado que pode ser lançado em corpos hídricos sem prejudicar o ecossistema, entretanto, no sistema “lodos ativados” cerca de 50% do lodo produzido retorna para o processo para retroalimentar o sistema biológico, mas o restante precisa ser eliminado para manter o equilíbrio e garantir a performance desejada. O lodo gerado precisa passar por um tratamento para eliminar umidade, e então, é transportado e comumente destinado em aterros sanitários. A gestão inadequada desses resíduos pode resultar em grave poluição ambiental, como odor, transmissão de doenças e emissão de gases de efeito estufa, contribuindo assim para o aquecimento global (SINGH et al., 2011).

O lodo bruto, resultante do tratamento de esgoto, possui cerca de 0,25% de teor de sólidos (WERTHER; OGADA, 1999). Geralmente, ele passa por um processo de adensamento, que pode ser por gravidade ou flotação, que elimina umidade aumentando seu teor de sólidos para em torno de 7% (HOUDKOVÁ et al., 2008), depois disso, o lodo precisa ser desidratado. Dentre os métodos mais usados para deságue de lodo pode-se destacar: leito de secagem, geobags, centrifugação e prensa desaguadora. Nos leitos de secagem o lodo, ao ser removido, apresenta teor de sólidos de 40 a 75%, dependendo das condições climáticas e do período de secagem. Os ciclos de secagem variam de 25 a 35 dias, destacam-se pela simplicidade construtiva e operacional. No entanto, em razão dos requisitos de área, tendem a ser inviáveis para ETE de grande porte (CERQUEIRA; AISSE, 2017). Os geobags conseguem garantir um aumento no percentual de sólidos do lodo entre 22% e 27% em períodos relativamente curtos (FOWLER et al., 1996), mas também demandam grandes áreas,

muita mão-de-obra e possuem custo elevado, além disso, após seu uso, o bag também precisa ser descartado, ou seja, maior geração de resíduos. Por fim, tem-se os equipamentos de desidratação por centrifugação e prensa, que permitem aumentar o teor de sólidos do lodo entre 20% e 40%, e as prensas desaguadoras podem garantir até 42% (WERTHER; OGADA, 1999), a percentagem de sólidos pode ser variada por mudanças dos parâmetros operacionais (USEPA, 1987). São equipamentos bem compactos e de fácil operação, porém, apresentam consumo energético elevado, e alto custo de manutenção, mas é importante frisar que, quanto mais eficiente o processo de desidratação, menores serão os custos envolvidos com transporte e destinação de lodo (THAPA et al., 2009).

Segundo Gonçalves et al. (2001), a seleção do processo de desidratação depende do tipo de lodo e da área disponível. Para Estações de Tratamento que dispõem de grandes áreas de implantação e atendem uma pequena população, os leitos de secagem e os geobags são a melhor alternativa. Porém, quando se trata de ETE compacta, localizadas em grandes centros, com restrição de espaço, as centrífugas e prensas tornam-se a opção mais atraente.

Após desidratado, o lodo é transportado para então ser destinado em aterro sanitário. Esse transporte precisa ser realizado por empresas especializadas e devidamente licenciadas pelos órgãos ambientais, o que torna o número de empresas reduzido e eleva consideravelmente o custo. Os aterros sanitários normalmente se instalam em locais distantes, e não podem ser encontrados em todas as cidades, além disso, os aterros têm vida útil, ou seja, eles têm limite para recebimento de resíduos, e praticam valores mais elevados para o recebimento do lodo, do que os valores praticados para resíduos orgânicos comuns. Os custos com disposição de lodo chegam a representar até 60% dos custos operacionais de uma ETE (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento com foco em Resíduos Sólidos (SNIS-RS, 2019), o Brasil possui 1.114 lixões, 580 unidades de aterros controlados e 621 aterros sanitários. Há 5.570 municípios no país, ou seja, o número de aterros já é insuficiente hoje, e considerando que a vida útil de um aterro controlado gira em torno de 10 a 20 anos, caso não haja novos investimentos no setor é possível que até 2033 esse número seja ainda menor.

Além do alto custo e da iminente escassez, pesquisas revelam que a destinação de lodos em aterros sanitários tem efeitos negativos substanciais ao ecossistema, às condições climáticas, à saúde humana, com emissão desordenada de gases do efeito estufa (GEE) e formação de compostos ácidos (FERNÁNDEZ-NAVA et al., 2014).

A fim de reduzir os custos com tratamento, transporte e disposição de lodos é necessário buscar alternativas sustentáveis para fechar o ciclo do processo de tratamento de esgotos. O lodo de ETE é um material rico em nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, e se bioestabilizado adequadamente pode ser transformado em fertilizante. Porém, existe uma série de contraindicações quanto à sua aplicação, visto que o lodo também pode conter além de patógenos, outros componentes químicos que comprometem a qualidade do solo, tais como os metais pesados. Com base nisso, os sistemas orgânicos de produção são regulamentados pela Lei nº 10.831/2003, e Decreto nº 6.323/2007, que atribui ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), de forma isolada ou em conjunto com outros Ministérios, o estabelecimento de normas técnicas para a obtenção do produto orgânico. O MAPA publicou 5 Instruções Normativas (IN) relacionadas ao uso de compostos orgânicos, são elas: IN SDA Mapa nº 35/2006, que trata do uso de compostos orgânicos como condicionadores de solo, a IN Mapa nº 05/2016, para o uso como substrato para plantas, IN SDA Mapa nº 61/2020, para o uso como fertilizante orgânico composto, os Anexos IV e V da IN SDA Mapa nº 27/2006, alterada pela IN SDA Mapa nº 07/2016 que define seus respectivos limites de tolerância para contaminantes e a Portaria Mapa nº 52/2021 sobre o seu uso na agricultura orgânica (TRIVELLA, 2022). O Conselho Nacional de Meio Ambiente, através da Resolução 498, também estabeleceu critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos (BRASIL, 2020). Desde que atendidos os critérios estabelecidos nessas normas e resoluções, o lodo pode ser reutilizado como adubo, entre as exigências está a aplicação de método de redução de patógenos e de atratividade de vetores. Existem algumas técnicas aceitas para remoção de patógenos, dentre elas a compostagem, um processo de decomposição de resíduos orgânicos realizado por microrganismos em condições ambientais controladas (ZHOU et al., 2015).

Compostagem é a decomposição biológica e a estabilização de substratos orgânicos, sob condições propícias ao desenvolvimento de temperaturas termofílicas como o resultado do calor produzido biologicamente, para alcançar um produto que é

mais estável, livre de agentes patogênicos e que pode ser benéficamente aplicado na terra (HAUG, 1993). Para um processo de compostagem de qualidade é necessário atentar para alguns fatores, tais como: pH, umidade, relação C/N e dimensões físicas (INÁCIO; MILLER, 2009). E para alcançar essa condição de equilíbrio é preciso associar outros materiais ao composto, denominados materiais estruturantes, que garantem a porosidade da massa a ser compostada, como por exemplo, folhosas de vegetais, palhas e cascas, restos de alimentos e restos da manutenção das áreas verdes, resíduos gerados diariamente pelas prefeituras no serviço de poda das cidades.

Eliot Epstein (1997) e Pelegrino et al. (2008) descreveram algumas das vantagens do processo de compostagem, tais como: desinfecção do lodo pela redução dos patógenos, decomposição da matéria orgânica para a produção de um composto mais estável, que pode ser aplicado no enriquecimento do solo pela reciclagem de nutrientes, uma alternativa de redução de custos, frente a outras formas de tratamento e destinação de lodo, e economia de área em aterro sanitário, aumentando a sua vida útil.

Diante disso, até 2033 a compostagem poderá configurar uma alternativa imprescindível para viabilizar a universalização dos serviços de tratamento de esgoto no Brasil. O que resta avaliar são as alternativas técnicas de tornar esse processo de compostagem de lodo possível, tais como: (i) as misturas possíveis de resíduos para atingir um composto de acordo com os padrões estabelecidos pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Ao analisar as INs e a Portaria relacionadas aos diferentes usos para os compostos orgânicos na agricultura compreende-se sua complexidade, dadas as inúmeras alterações que sofreram no decorrer do processo histórico (TRIVELLA, 2022). (ii) os custos envolvidos no processamento do lodo para a compostagem e consequente produção desse fertilizante (iii) e compará-los aos custos atuais das companhias de saneamento com a destinação desse resíduo em aterro sanitário. Sendo assim, as análises de custo de produção e a viabilidade econômico-financeira são ferramentas extremamente importantes e imprescindíveis para notar a tomada de decisão de um negócio e/ou empreendimento (SEBASTIÃO, 2014).

Além de representar uma alternativa de redução de custos para as Companhias de Saneamento, por evitar a destinação em aterros sanitários, o que representa um custo

significativo, a produção e a comercialização de fertilizante, pode configurar um novo negócio para essas empresas, com geração de receita acessória. Por outro lado, através de parcerias com cooperativas e prefeituras, pode se revelar também, como um projeto socioambiental, que atualmente vem sendo exigido por instituições financeiras para concessão de financiamentos, ou mesmo para obtenção de incentivos fiscais junto ao governo.

O lodo compostado pode ser utilizado como fertilizante na silvicultura, no florestamento e reflorestamento, na recuperação de áreas degradadas e na produção de mudas de árvores, mas seu uso é vetado em pastagens, no cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, nas culturas inundadas e nas demais culturas cuja parte comestível entra em contato com o solo (BRASIL, 2006).

Sendo assim, esse trabalho está voltado para estudar a viabilidade técnica e econômico-financeira de um projeto de compostagem de lodo, de uma Estação Municipal de Tratamento de Esgotos, localizada no município de Atibaia, São Paulo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade técnica e econômico-financeira da aplicação de técnicas de compostagem no gerenciamento do lodo gerado no processo de tratamento de esgoto por lodos ativados, como uma alternativa sustentável de destinação desse resíduo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, buscou-se:

- i) Obter a proporção de material estruturante e a proporção de lodo de esgoto adequadas para o processo de decomposição;
- ii) realizar um projeto piloto de compostagem em escala real a partir do resultado obtido;

- iii) caracterizar os compostos produzidos quanto aos aspectos físico-químicos e microbiológicos, de acordo com a legislação vigente e por fim;
- iv) analisar a viabilidade econômico-financeira da implantação de uma unidade de tratamento de resíduo sólido orgânico, via compostagem.

Espera-se que este trabalho contribua para a orientação das Companhias de Saneamento em como escolher a melhor alternativa para fazer o gerenciamento do seu lodo nos pontos de vista ambiental e financeiro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está dividida em dez subitens, que são: (i) o saneamento no Brasil, (ii) resíduos sólidos no Brasil, (iii) tratamento de esgotos, (iv) lodo de esgoto, métodos de compostagem de lodo, (v) legislação brasileira, (vi) demanda por fertilizantes no Brasil, (vii) viabilidade econômico-financeira, (viii) *green bonds* e (ix) políticas públicas.

3.1 O SANEAMENTO NO BRASIL

Admite-se que o acesso a água potável e ao saneamento básico é um direito fundamental necessário para assegurar a saúde e, portanto, a sobrevivência da atual e das futuras gerações. Reconhecido pela Organização das Nações Unidas em Assembleia Geral, realizada em 2010, como um direito humano e estabelecido entre os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável-ODS (ONU, 2022)

No Brasil, sempre se alimentou o mito de que devido ao país ser rico em disponibilidade hídrica a falta d'água se restringiria a região Nordeste, porém desde 2013 as regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste também vêm enfrentando problemas de escassez hídrica (BRITO, 2018), e os especialistas apontam que uma das principais causas da crise hídrica é o uso inadequado do solo, o desafio de garantir o ciclo hidrológico natural para manter a recarga dos aquíferos, e a falta de saneamento básico.

De acordo com o Instituto Trata Brasil, cerca de 35 milhões de brasileiros não têm acesso à água potável e 100 milhões não contam com coleta e tratamento de esgotos (2022). Todos os dias mais de 5,3 mil piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento são despejadas na natureza, o que compromete mais de 110 mil quilômetros dos rios

brasileiros expostos a poluição, e estima-se que para reverter esse cenário até 2033 serão necessários cerca de R\$ 753 bilhões em investimentos (ABCON, 2022).

Para um melhor entendimento da trajetória do saneamento básico no Brasil é importante conhecer como ela começou, em 1561, quando foi escavado o primeiro poço artesiano para abastecer a cidade do Rio de Janeiro (BARROS, 2014b). Em 1864, mais de 300 anos depois, também na cidade do Rio de Janeiro, foi concluída a instalação da primeira rede de esgoto (AZEVEDO NETTO, 1959). Somente em 1892, o Serviço Sanitário foi criado pela lei número 43 e era composto por um conselho de Saúde Pública e ficava subordinado a Secretaria do Estado do Interior (MIRANZI et al, 2010). Em 1968, os militares criaram o Plano Nacional de Saneamento, PLANASA, que alcançou avanços importantes até 1986 quando, suas regras começaram a ser abandonadas, e o sistema de financiamento que lhe dava suporte foi extinto (MONTEIRO, 1993). Desde então, uma série de leis relacionadas ao saneamento foram criadas, mas apenas em 2007 foi aprovada a lei 11.445, que estabeleceu normas para o saneamento básico (BRASIL, 2007).

A lei 11.445/07 definiu o saneamento básico como conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de: abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo de águas pluviais. A lei também determinou a elaboração do Plano Nacional de Saneamento Básico, o PLANSAB, iniciado em 2008 e aprovado em 2013, pelo decreto nº 8.141 de 20 de novembro de 2013 e pela Portaria Interministerial nº 571 de 05 de dezembro de 2013, consiste no planejamento integrado do saneamento básico considerando seus quatro componentes, acima destacados num horizonte de 20 anos (BRASIL, 2013).

Embora todas as diretrizes criadas parecessem excelentes na teoria, foram ineficazes na prática, já que em 2020, após treze anos da promulgação da Lei Federal nº 11.445, pouco se tinha avançado e praticamente metade de população brasileira ainda não tinha acesso a esgoto tratado. Assim, no dia 15 de julho de 2020, foi sancionada a Lei nº 14.026, estruturada em 3 pilares: regulação adequada, maior competição e geração de ganhos de escala aprimorada na operação, a partir da regionalização, ou seja, formação de blocos entre municípios de maior e menor potencial econômico de forma a garantir igualdade de investimentos sem comprometer a lucratividade dos operadores (ABCON, 2022).

Desde que foi criada, a lei 14.026/20 vem mostrando avanços no setor, dentre eles: a Publicação do Decreto 10.588/2020 Apoio e técnico e financeiro da União em dezembro de 2020, a Publicação do Decreto 10.710/2021 Comprovação da capacidade econômico-financeira, em maio de 2021, que definiu prazo para que as Companhias Estatais de Saneamento demonstrassem que estavam aptas financeiramente a dar sequência aos contratos de programa vigentes até dezembro de 2021, o estabelecimento, pelos Estados, das Unidades Regionais de Saneamento Básico. Caso o prazo não fosse respeitado, o Poder Executivo Federal estabeleceria os blocos de referência. Em março de 2022, a inclusão das metas nos contratos em vigor, em abril de 2022 a publicação do Decreto 11.030/2022 que alterou o Decreto 10.588/2020 e tratou da regularização de operações. E, em dezembro de 2022 finalizou o prazo para publicação dos planos de saneamento básico, conforme Art. 19 da Lei 14.026/2020. Todas essas etapas com o objetivo de garantir o cumprimento das metas de universalização até dezembro de 2033.

Além dos avanços no âmbito regulatório, de forma prática, após 20 meses da assinatura do Novo Marco, ocorreram 16 concorrências públicas, R\$ 76,2 bilhões em outorga e investimentos previstos já contratados para as concessões de saneamento, através de leilão, e cerca de 20 milhões de pessoas beneficiadas. Além disso, os leilões de saneamento geraram como outorga R\$ 29,4 bilhões de recursos para estados e municípios por todo o país (ABCON, 2022). Tendo em vista os investimentos previstos, mais de 16,5 milhões de pessoas terão garantia de água potável e esgoto tratado.

Outro ponto que foi potencializado pela lei 14.026, foi a participação da iniciativa privada no setor de saneamento, em 2020 ela estava presente em 6% dos municípios, em 2022, esse número já passou para 9,1% e 16% do total de investimentos realizados no setor, o investimento por ligação entre os operadores privados é 131% superior ao realizado pelas companhias estaduais e 326% superior ao de serviços municipais (ABCON, 2022).

Com todos esses investimentos, a expectativa é que as coberturas de tratamento de água e esgoto no país cresçam de forma que, em 2033 a cobertura de água no Brasil alcance 99% da população e a cobertura de esgoto atinja 90% dos brasileiros.

No entanto, como definido na lei 11.445/07, o saneamento básico vai além de água e esgoto, e um ponto que precisa ser observado com os avanços na universalização dos serviços públicos de água e esgoto é o aumento da geração de resíduos sólidos no país.

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento com foco em resíduos sólidos, SNIS-RS, no ano de 2020 a geração de resíduos sólidos per capita urbana no Brasil foi 1,01 kg.(hab.dia)⁻¹, o que demonstra uma geração de aproximadamente 66,6 milhões de toneladas de resíduos no país naquele ano (SNIS-RS, 2022).

O Brasil tem 5.570 municípios, ainda de acordo com o SNIS-RS, em 2020 haviam somente 5.018 unidades de processamento de resíduos, dessas apenas 617 aterros controlados, 652 aterros sanitários e 1.545 unidades eram lixões, ou seja, a maior parte dos resíduos sólidos gerados no país é descartada de maneira irregular.

No ano de 2010, foi criada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, com o objetivo de extinguir os lixões e dar lugar a Aterros Sanitários, a fim de garantir que os rejeitos dos resíduos sólidos urbanos (RSU) somente deveriam ser dispostos em aterros quando não apresentassem potencial de reutilização, como por exemplo: a logística reversa e a reciclagem dos materiais (BRASIL, 2010). Mas como já foi dito, após dez anos da lei, isso ainda não é realidade. Pelo contrário, de acordo com dados do CEMPRE, Compromisso Empresarial Para Reciclagem (2013), o Brasil perde anualmente oito milhões de reais ao enterrar resíduos sólidos que poderiam ser reciclados, dentre eles, o lodo de esgoto.

A Lei 14.026/20 também reforçou a necessidade de se extinguir os lixões e estabeleceu extensão do prazo para essa obrigação (de acordo com a Lei 12.305/10 o prazo era 2014, mas não foi cumprido), sendo:

I - até 2 de agosto de 2021, para capitais de Estados e Municípios integrantes de Região Metropolitana (RM) ou de Região Integrada de Desenvolvimento (Ride) de capitais;

II - até 2 de agosto de 2022, para Municípios com população superior a 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010, bem como para Municípios cuja mancha urbana da sede municipal esteja situada a menos de 20 (vinte) quilômetros da fronteira com países limítrofes;

III - até 2 de agosto de 2023, para Municípios com população entre 50.000 (cinquenta mil) e 100.000 (cem mil) habitantes no Censo 2010; e

IV - até 2 de agosto de 2024, para Municípios com população inferior a 50.000 (cinquenta mil) habitantes no Censo 2010.

Como pode ser observado, mesmo nas condições atuais, a geração elevada e a destinação adequada dos resíduos sólidos já é uma preocupação no Brasil. Com a universalização da cobertura de água e esgoto até 2033, contribuindo para o aumento substancial da geração de lodo oriundo do processo de tratamento, é imprescindível antever uma solução, que seja principalmente, aderente a lei 12.305/10, ou seja, que viabilize a reciclagem. Segundo dados do Ministério do Meio Ambiente, os resíduos orgânicos representam cerca de 50% do total de resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil, o que significa aproximadamente 40 mil toneladas, das quais apenas 1% é reaproveitado (ASSEMAE, 2019). Já os resíduos de madeira anualmente gerados no país são estimados em 30 milhões de toneladas, das quais 8% representam a poda das cidades. Restos de alimentos têm como característica a baixa relação carbono:nitrogênio ($C/N < 30$) e alta densidade ($> 400 \text{ kg.m}^{-3}$) enquanto podas urbanas possuem alta relação $C/N (>30)$ e baixa densidade ($< 400 \text{ kg.m}^{-3}$), configurando assim uma mistura potencialmente adequada para compostagem. Lodos de esgoto apresentam C/N ainda mais baixa que os restos de alimentos (<10) e elevada densidade.

3.3 TRATAMENTO DE ESGOTOS

De acordo com o Sistema Nacional de Informação do Saneamento (SNIS) o consumo médio per capita de água no Brasil é de $152,1 \text{ L.}(\text{hab.dia})^{-1}$. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) recomenda a utilização de um coeficiente de 0,8 de esgoto gerado em relação a água consumida (ABNT, 1986).

Considerando a população estimada para 2033 pelo IBGE, 227.638.581 habitantes (IBGE, 2022), a produção de esgotos no ano em que a Lei 14.026/20 prevê a universalização será de aproximadamente 10.110.157,83 mil m^3 e 90% desse total deverá ser devidamente coletado e tratado, para só então ser devolvido ao meio ambiente para garantia da conservação hídrica.

Existem vários tipos de tratamento de esgoto que podem ser físicos, químicos e biológicos. Metcalf e Eddy (2003) definiram os níveis de tratamento de esgoto e suas atribuições:

Tratamento preliminar: é um tratamento físico aplicado para a remoção de sólidos grosseiros seus componentes são gradeamentos, desarenadores ou caixas de areia e, eventualmente, caixas de gordura.

Tratamento primário: pode ser físico ou físico-químico, destina-se a remoção de sólidos em suspensão através de decantadores, flotores, com coagulação e floculação.

Tratamento Secundário: tratamento biológico aplicado na remoção de matéria orgânica, medida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A DBO em suspensão, não removida no tratamento primário, ou a solúvel, sólidos dissolvidos. Pode ser classificado como aeróbio (presença de O₂) e anaeróbio (ausência de O₂ e nitrato).

Tratamento terciário: consistem em técnicas físico-químicas ou biológicas destinadas a remoção de nutrientes, patógenos, compostos não-biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e sólidos em suspensão remanescentes.

Tratamento avançado: remoção de poluentes resistentes, materiais suspensos e dissolvidos remanescentes. Pode ser destinado a produção de água de reuso, por meio de processos oxidativos avançados, como adsorção por carvão ativado, eletrodialise, troca iônica ou membranas de ultrafiltração e osmose inversa.

No Brasil, o tratamento mais empregado é até o nível secundário. Na Tabela 1 abaixo estão elencados os principais sistemas de tratamento encontrados no Brasil:

Tabela 1. Tipos de tratamento de esgoto mais empregados no Brasil

Tipos de tratamento de esgoto mais empregados no Brasil		
Lagoas de estabilização	Lagoa facultativa	A DBO solúvel é estabilizada por bactérias aeróbias, cujo oxigênio é fornecido por algas, via fotossíntese, e a DBO suspensa é sedimentada, e estabilizada anaerobiamente pelos microrganismos no fundo da lagoa.
	Lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa	Parte da DBO é estabilizada na lagoa anaeróbia e o restante da matéria orgânica é removida na lagoa facultativa.
	Lagoa aerada facultativa	Se assemelha a lagoa facultativa, porém o oxigênio é fornecido através de aeradores mecânicos.

	Lagoa aerada de mistura completa seguida de lagoa de decantação	Lagoa com aeração mecânica, em que o oxigênio introduzido pelos aeradores é elevado, fazendo com que os sólidos (principalmente biomassa) permaneçam dispersos no meio líquido, ou em mistura completa, seguida de uma lagoa de sedimentação.
	Lagoas de alta taxa	Lagoas que possuem profundidade reduzidas, garantindo a penetração de luz em toda a massa líquida a fim de fornecer um ambiente totalmente aeróbio com altas concentrações de oxigênio dissolvido.
Lodos Ativados	Lodos ativados por aeração convencional	O esgoto passa por um decantador primário para remoção dos sólidos sedimentáveis, e em seguida é encaminhado para o reator biológico, para remoção da matéria orgânica por microrganismos aeróbios. O oxigênio é fornecido por aeradores mecânicos ou por ar difuso, responsáveis pela mistura entre sólido e líquido, que se separam posteriormente nos decantadores secundários. Parte do lodo decantado é recirculada para o tanque de aeração e o lodo em excesso vai para o tratamento do lodo.
	Lodos ativados por aeração prolongada	Não há decantador primário, por isso a biomassa fica mais tempo no sistema, logo, há menor quantidade de DBO disponível para as bactérias, fazendo com que elas utilizem a matéria orgânica de seu próprio material celular, produzindo assim um lodo já estabilizado.
	Lodos ativados de fluxo Intermitente	As etapas de aeração e sedimentação ocorrem no mesmo tanque. Podem ser convencional ou de aeração prolongada.
	Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio	O reator biológico conta com uma zona anóxica onde os nitratos formados pela nitrificação na zona aeróbia são transformados em nitrogênio e liberados na forma de gás.
	Lodos ativados com remoção biológica de fósforo	Devido às recirculações internas a biomassa fica exposta a condições anaeróbias e aeróbias, alternadamente. Com isso, microrganismos capturam o fósforo do meio líquido, que é removido no lodo.
	Sistemas aeróbio com biofilmes	Filtro de baixa carga
Filtro de alta carga		Semelhante ao sistema de baixa carga, porém com maior carga de DBO. O lodo excedente precisa ser estabilizado.
Biofiltro aerado submerso		Reator preenchido com material poroso, que serve de meio-suporte para aderir os microrganismos e de meio filtrante.
Biodisco		Discos que giram em baixas rotações e servem de meio-suporte para a biomassa, alternando em imersão parcial no esgoto e exposição parcial ao ar.

Sistemas anaeróbios	Filtro anaeróbio	A DBO é estabilizada por microrganismos anaeróbios aderidos a um meio-suporte. Seguido de decantação primária, com produção de lodo baixa e ele já sai estabilizado.
	Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB)	Parte da DBO é degradada por microrganismos anaeróbios da manta de lodo em biogás. Não há decantação primária e a produção de lodo é baixa e ele já sai estabilizado. Pode ser seguido de pós-tratamento, biológico ou físico-químico para aumento de eficiência.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

Cornelli et al. (2014) destacou os principais métodos de tratamento de esgoto e suas vantagens e desvantagens. Entre os métodos mais citados estão o tratamento anaeróbio/UASB, e lodos ativados. A Tabela 2 indica os itens positivos e negativos dessas formas de tratamento de esgoto bastante empregadas no Brasil, nos aspectos: técnico, econômico, social e ambiental.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens dos tratamentos UASB x Lodos Ativados

Comparação dos tratamentos Anaeróbio/UASB e Lodos Ativados				
Aspectos	Formas de Tratamento			
	UASB		Lodos Ativados	
	Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Técnico	<ul style="list-style-type: none"> - suporta a elevadas cargas orgânicas; - consumo baixo de energia; - não requer meio suporte; - construção, operação e manutenção simples; - produção de lodo baixa; - estabilização do lodo no próprio reator; - fácil desidratação do lodo; - rápida retomada do processo em caso de paralisação 	<ul style="list-style-type: none"> - menos eficaz na remoção de DBO; - menos eficaz na remoção de coliformes; - não apropriado para remoção de nitrogênio e fósforo; - aspecto do efluente pode ser desagradável; - produz maus odores; - partida lenta; - sensível a variação de carga e compostos orgânicos; - precisa de pós-tratamento. 	<ul style="list-style-type: none"> - requer áreas menores; - método eficaz na remoção de DBO; - pode ser utilizado em qualquer escala. 	<ul style="list-style-type: none"> - demanda mão-de-obra especializada e em tempo integral; - processo mais delicado; - produz mais lodo; - requer área para tratamento e descarte de lodo.
Econômico	<ul style="list-style-type: none"> - menor custo com área - custo reduzido de implantação e operação; - economia de energia elétrica; - possibilidade de receita a comercialização do biogás; - não há gastos para estabilização do lodo; 	<ul style="list-style-type: none"> - custos com pós-tratamento. - Custo com disposição final de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> - custos menores com área. 	<ul style="list-style-type: none"> - custo operacional alto; - custo adicional da área para tratamento e descarte de lodo; - maior custo com mão-de-obra.

Social	<ul style="list-style-type: none"> - pode ser utilizada a mão-de-obra local devido a simplicidade do processo; - sobra área disponível para uso da comunidade; - Utilização do biogás para projetos sociais. 	<ul style="list-style-type: none"> - difícil satisfação de padrões mínimos restritivos para a segurança da comunidade; - aspecto visual do efluente; - geração de odores desagradáveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - sobra área disponível para uso da comunidade; - projeto se adapta a pequenas e grandes comunidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade de encontrar mão-de-obra qualificada.
Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> - requer áreas pequenas; - consome pouca energia; - possibilidade de aproveitamento de biogás para produção de energia; - geração baixa de lodo; - estabilização do lodo no próprio reator; - lodo apresenta boa desidratabilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> - menos eficiente na remoção de carga orgânica; - emite odores desagradáveis; - não remove nutrientes. - requer disposição final de lodo. 	<ul style="list-style-type: none"> - remoção eficaz de carga orgânica; - requer áreas pequenas; - aplicável para pequenas e grandes comunidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - gera mais lodo; - requer mais área para descarte de lodo.

Fonte: Adaptado de REA – Revista de estudos ambientais (Online) v.16, n. 2, p.20 - 36, jul./dez.

2014

Como é possível inferir pela Tabela 2 acima, embora apresente vantagens econômicas, o método UASB não apresenta performance satisfatória para atender os parâmetros de lançamento exigidos pela legislação CONAMA 430/11 (BRASIL, 2011), por essa razão o foco do presente estudo será um sistema de tratamento por Lodos Ativados, e uma forma sustentável de mitigar suas desvantagens, especificamente redução de custo operacional e alternativa para evitar a necessidade de descartar o lodo gerado em grande quantidade.

3.4 LODO DE ESGOTO

Corrêa et al. (2007) disse que processos de tratamento de esgoto fazem separação da parte sólida e da parte líquida para que a parte líquida, ou seja, o efluente tratado possa ser liberado em corpos hídricos sem causar prejuízos ao meio ambiente.

Já a parte sólida, composta por poluentes, nutrientes e contaminantes fica concentrada em uma massa denominada lodo de esgoto, tido como o subproduto do tratamento. Segundo Marques (1990) o lodo de esgoto gerado em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) pode ser definido como material sólido, constituído basicamente de matéria orgânica, elementos nutrientes de plantas e metais pesados, além de microrganismos patogênicos ou não, que a USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1995) definiu como biossólidos.

Lodo de esgotos ou biossólidos podem ser entendidos como, um produto orgânico resultante do tratamento de esgotos, que pode ser utilizado ou reciclado sem causar danos ambientais e de prejuízos para a saúde de animais e humanos (USEPA,1995).

Em um sistema de lodos ativados, a quantidade típica que se refere à produção de lodo é de 50 gramas por dia para cada habitante (METCALF & EDDY, INC., 1991). Por outro lado, Von Sperling e Gonçalves (2001) estudando a produção de lodos em ETEs para diferentes processos de tratamento constataram que a produção de lodo no processo de lodos ativados convencional é de 60 - 80 g SS por dia, para cada habitante.

3.4.1 Gerenciamento de lodo de ETE

Como já mencionado na sessão anterior, o sistema de tratamento que mais gera lodo é o lodos ativados convencional (ANDREOLI, 2001), visto que o tempo de permanência do lodo no tanque de aeração é baixo, logo, não há tempo para o lodo ser digerido. De acordo com Metcalf e Eddy (2002) a geração de lodo de um sistema de lodos ativados convencional pode variar entre 3,1 e 8,2 L.(hab.dia)⁻¹, enquanto a nível de comparação, a geração de lodo de um sistema UASB gira em torno de 0,2 a 0,6 L.(hab.dia)⁻¹.

O gerenciamento do lodo, por sua vez, é uma atividade complexa e de alto custo, que se não for bem executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados dos sistemas de tratamento de esgotos (LUDUVICE, 2001). O tratamento de lodo representa cerca de 40% dos custos de implantação de uma ETE aeróbia, 50% de seus custos de operação e 90% dos problemas operacionais (KHIARI et al, 2004). O lodo pode exalar odores indesejáveis, além de transmitir doenças por conter organismos patogênicos, logo, é necessário que as empresas de saneamento

procedam com seu tratamento, cujo objetivo é gerar um produto mais estável de menor volume (PEDROZA et al, 2010).

Cassini (2003) detalhou as principais etapas do tratamento de lodo:

- Adensamento de lodo: redução de umidade, e conseqüentemente, de volume;
- Estabilização: redução de matéria orgânica;
- Condicionamento: preparação para desidratação;
- Desidratação: Redução adicional de umidade e volume;
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

3.4.2 Adensamento de lodo

O processo de adensamento objetiva aumentar a concentração de sólidos no lodo e pode se dar das seguintes formas: por gravidade, flotação, centrifugação, adensador de esteira e tambor rotativo (METCALF; EDDY, 2002), sua eficiência pode elevar a concentração de sólidos no lodo de 2% a 4% para até 12% (BITTON, 2001). Uma das principais vantagens do adensamento é a redução no consumo de produtos químicos e energia elétrica nos processos de desidratação de lodo subsequentes (MIKI et al., 2006).

3.4.3 Estabilização de lodo

A estabilização do lodo é um processo que visa mineralizar a fração biodegradável da matéria orgânica contida no lodo para reduzir os riscos de putrefação e reduzir patógenos (METCALF; EDDY, 2002). Ela pode ser por digestão anaeróbia ou digestão aeróbia, compostagem, estabilização química, ou térmica (LUDUVICE, 2001).

Chernicharo (1997) considerou a digestão anaeróbia como um ecossistema onde, na ausência de oxigênio, diversos grupos de microrganismos degradam a matéria orgânica complexa produzindo metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico, amônia e novas células.

De acordo com Metcalf et al. (2002) a digestão aeróbia ocorre em tanques abertos de aproximadamente 3 a 6 metros de profundidade através da adição de ar ou oxigênio

no lodo, o processo gira em torno de 12 a 30 dias e a concentração de oxigênio no reator é mantida em torno de 1 mg.L^{-1} visando evitar a liberação de gases fétidos.

A compostagem é um processo biológico aeróbio, no qual os sólidos orgânicos biodegradáveis são estabilizados por microrganismos mesófilos ou termófilos, que tem como produto final, um fertilizante rico em ácidos húmicos, além de vapor d'água e gás carbônico. Durante o processo de biodegradação da matéria orgânica, a temperatura é elevada até atingir entre 60 a 65°C nos primeiros dias do processo, o que contribui para a eliminação de microrganismos patogênicos presentes no biossólido (SIMONETI, 2006). Esse processo será abordado em um tópico exclusivo mais adiante.

Processos de estabilização química são eficientes na eliminação dos ovos de helmintos mais resistentes (CASSINI, 2003). Já os processos com tratamento térmico são usados para estabilizar o biossólido. Esses processos consistem no aquecimento do biossólido sob pressão, por um curto período, tornando-o esterilizado. O biossólido é aquecido a uma temperatura igual ou superior a 180 °C, durante, no mínimo 30 minutos (SIMONETI, 2006). Esse processo reduz, efetivamente, vírus patogênicos, bactérias e ovos de helmintos a níveis abaixo dos detectáveis. No entanto, o biossólido deve ser devidamente acondicionado em seguida, pois a matéria orgânica não é reduzida, logo, pode ocorrer o ressurgimento de organismos patogênicos no material tratado (ANDREOLI et al, 2006).

3.4.4 Condicionamento do lodo

O condicionamento do lodo pode ocorrer por processos físicos ou químicos, e tem por objetivo melhorar a separação das fases sólida e líquida do lodo (ALÉM SOBRINHO, 2006). O condicionamento físico pode ser realizado através de tratamento térmico, conferindo calor ao lodo produzindo menor teor de umidade (VAN HAANDEL, 2006) já o químico pode ser pela adição de coagulantes ou polímeros (BITTON, 2001), esses produtos provocam a desestabilização das partículas de lodo formando flocos maiores, mais fáceis de serem separados da fase líquida (MIKI et al, 2006).

Nos processos em que são utilizados condicionantes químicos, as filtrações do lodo aumentam a concentração de sólidos de 20 a 40% dependendo do tipo de lodo e da forma de filtração (PEDROZA et al, 2010).

3.4.5. Desidratação de lodo

Existem vários tipos de processos de desidratação de lodo, e sua escolha depende das características do lodo gerado, eles podem ser por secagem natural ou mecanizada. Os métodos naturais mais comuns são os leitos de secagem e as lagoas de lodo. Além desses, há também os geobags, que começaram a ser utilizados na desidratação de lodo em meados dos anos 1990 (FOWLER et al. 1996), e podem ou não utilizar polímeros para aceleração dos resultados. De acordo com Barroso (2007), os filtros sintéticos, conhecidos como Bags, também denominados geotêxteis, são mantas permeáveis, flexíveis e finas produzidas a partir de fibras sintéticas. Um lodo desidratado em geobag sem polímero deverá atingir um percentual de sólidos de 15% em 4 meses, enquanto com aplicação de polímero é possível atingir esse mesmo resultado entre 1,5 e 2 meses (LAWSON, 2008).

Além Sobrinho (2001) classificou os tipos de equipamentos de desidratação, são eles: filtro prensa de placas, filtro prensa de esteiras e centrífugas. A performance dos equipamentos vai depender do tipo de estabilização a que o lodo foi submetido, de um modo geral, será sempre melhor quando o lodo for digerido anaerobicamente.

As centrífugas são equipamentos que se destinam à desidratação do lodo, separando os sólidos da água por diferença da força centrífuga. A concentração dos sólidos que entram na centrífuga é de 3 a 5% e a concentração de sólidos no lodo desidratado varia de 20 a 30%. As centrífugas operam com uma alimentação contínua, e removem sólidos por meio de um transportador em espiral e descarga contínua do líquido. O líquido efluente da centrífuga deve retornar ao início do tratamento, sendo misturado com o esgoto afluente à Estação. A centrífuga separa a torta de lodo desidratado e o clarificado, denominado também de “centrado”. Essa separação ocorre devido à diferença de densidade entre os sólidos do lodo e a água circundante. Esse processo de separação assemelha-se com o que ocorre num decantador por gravidade;

já a centrífuga utiliza uma força de 500 a 3000 vezes a força da gravidade (EPA, 2000; MIKI; ANDRIGUETI; ALÉM SOBRINHO, 2001).

3.4.6. Destinação do lodo

O tratamento e disposição de lodo devem ser realizados com o objetivo de minimizar problemas ambientais, tais como, maus odores e lançamento de contaminantes e patógenos no ambiente (HALLEY & MILLER, 1991). A destinação final do lodo de esgoto inclui principalmente aplicação em terras cultiváveis, aterro sanitário, incineração, compostagem e até o uso secundário em materiais de construção (RAHEEM ET AL., 2018). Neste trabalho vamos focar nos quatro primeiros meios de destinação.

3.4.6.1 Disposição de lodo em terras cultiváveis

O lodo de esgoto doméstico, após ter sido higienizado através de calcinação, pode ser aproveitado na agricultura para corrigir a acidez e conferir fertilidade ao solo (MATOS & MATOS, 2012). Além disso, o lodo contém concentrações significativas de nitrogênio e fósforo, que o confere potencial para o uso agrícola como fertilizante. No entanto, também inclui diferentes poluentes, inorgânicos, orgânicos, como metais pesados, microplásticos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e patógenos (SIEBIELSKA, 2014). Portanto, o espalhamento de lodo por muito tempo no solo pode levar à acúmulo de contaminantes e afetar os ecossistemas, logo sua administração, quando viável, deve ser feita com cuidado e atenção ao que preconiza as legislações vigentes.

No Estado de São Paulo, a taxa de aplicação de lodo de esgoto segue a norma técnica P4.230 da CETESB (2021) e leva em consideração o aporte de metais pesados, aporte de Nitrogênio em relação à demanda nutricional da planta e a reação do solo.

Có Júnior et al. (2008) avaliou os efeitos de quatro aplicações por ano de lodo de esgoto na qualidade de amostras de cana-de-açúcar e comparou com amostra testemunha, cuja fertilização foi feita através de fertilizante mineral, e constatou que, não houve diferença na qualidade das amostras, os valores de pureza do caldo foram

muito próximos entre 93,96 e 94,45%, destacando um expressivo potencial do uso do bio sólido para essa finalidade.

Chiba et al. (2008) testou o cultivo de cana-de-açúcar em argissolo tratado com lodo de esgoto e concluiu que a aplicação do resíduo não causou danos à qualidade do solo, em termos de metais pesados, mesmo com reaplicação em anos sucessivos. Houve aumento nos teores de zinco (Zn) e cobre (Cu) disponíveis no solo, porém abaixo dos limites aceitáveis pela legislação ambiental. Considerando que a disponibilidade do Zn no solo também é aumentada em valores de pH abaixo de 5,0–5,5 (ABREU et al., 2001) e que a correção de pH do solo pode não ser realizada rotineiramente, o monitoramento desses metais no solo e na planta se faz necessário para evitar possíveis problemas ambientais decorrentes da aplicação do lodo.

Sendo assim, a aplicação de lodo de esgoto como fonte de nutrientes pode ser uma alternativa para a destinação desse resíduo, já que nos estudos avaliados nesta revisão, não ocasionou riscos ao meio ambiente, porém há a necessidade de implementar ações de monitoramento das áreas tratadas com lodo por longos períodos (CHIBA et al. 2008). Complementarmente, Fernandes & Silva (1999) alertam que, o lodo contém microrganismos patogênicos, por isso, sua disposição no solo sem algum tipo de tratamento pode ocasionar risco a saúde pública. O tratamento e a disposição do lodo devem ser realizados com o objetivo de minimizar problemas ambientais como odor e lançamento no ambiente de contaminantes e patógenos (HALLEY & MILLER, 1991). A destinação final do lodo de esgoto inclui principalmente aplicação em terras cultiváveis, aterro sanitário e uso secundário em materiais de construção (RAHEEM et al., 2018).

3.4.6.2 Disposição de lodo em aterro sanitário

Embora muitos países já reutilizem amplamente o lodo como fertilizante, devido a razões técnicas e econômicas, os aterros sanitários ainda são a principal forma de dispor esse resíduo atualmente (XU et al., 2014; ZHANG et al., 2018). Entretanto, aterros sanitários demandam grandes áreas e em grandes centros urbanos, isso pode representar um empecilho relevante.

Wei Han et al. (2021) analisou diferentes formas de disposição de lodo de esgoto sob vários aspectos. Ele observou que do ponto de vista de impacto ambiental, o

método de disposição em aterro sanitário foi o que apresentou os piores índices, com impacto significativo no aumento do potencial de acidificação do solo, sendo o maior entre todos os métodos analisados, o segundo pior em termos de emissão de gases do efeito estufa (GEE) e o terceiro em potencial de eutrofização.

A destinação em aterros sanitários é uma alternativa tida como segura, mas o alto custo da manutenção, que nem sempre é realizada adequadamente, pode incorrer em problemas de contaminação do solo, ar e água (QUINTANA et al., 2011). Em países desenvolvidos, aterros sanitários já não são mais a principal alternativa para dispor lodo, pelo contrário, nos Estados Unidos, por exemplo, a disposição em aterros sanitários representa apenas 17% do total de lodo destinado (SPINOSA, 2011).

3.4.6.3 Incineração de lodo

Incinerar o lodo de esgoto tem sido uma opção crescente em países da Europa (RAHEEM et al., 2018). Além de demandar áreas bem menores, em comparação com os aterros sanitários, o processo de incineração de lodo, possibilita a recuperação de energia. A incineração pode recuperar os compostos orgânicos e converter parte do calor em energia elétrica. Ao mesmo tempo, ela pode reduzir o volume de lodo em 90% e eliminar os patógenos. As cinzas residuais da incineração de lodo podem ser descartadas em aterros ou podem ser usadas em materiais de construção (Xinyu et al., 2020).

A incineração do lodo consiste na sua secagem. O lodo passa por uma desidratação prévia para ter seu teor de umidade reduzido para 60%, antes do processo de incineração, e então o lodo pode ser incinerado sem entrada externa de energia (ABUSOGLU et al., 2017). Quanto menor o teor de umidade, maior o poder calorífico e a energia gerada pelo lodo (W. LIU, C.M. IORDAN, F. CHERUBINI et al, 2021). Além disso, para garantir a estabilidade da geração de energia de combustão, carvão é geralmente adicionado à geração de energia de co-combustão.

O ponto negativo da incineração é que ela produz muita emissão de gases do efeito estufa, principalmente gases de combustão (W. LIU, C.M. IORDAN, F. CHERUBINI et al, 2021). Atualmente, com o excesso de emissão de gases de combustão gerado em diversos seguimentos da indústria, e o crescente impacto que isso tem causado na

camada de ozônio, essa alternativa pode se tornar menos indicada para o gerenciamento do lodo de esgoto.

3.4.6.4 Pirólise de lodo para produção de biochar

Mayer et al. (2016), definiram biochar, ou biomassa carbonizada, como um material rico em carbono de origem pirogênica, semelhante a outros tipos de carvão, sendo definido como subproduto da geração de energia térmica ou elétrica e da produção de biodiesel ou bio-óleo a partir de biomassa. O biochar é produzido através da termo-decomposição de materiais orgânicos sob oferta limitada de oxigênio (O₂) e temperaturas relativamente baixas (<700 °C) (INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2018).

Segundo Yu et al. (2007), quando adicionado ao solo o biochar pode aumentar o seu pH, aperfeiçoar sua capacidade de troca catiônica e melhorar propriedades físicas, tornando-o mais fértil. Sun et al. (2015) afirmaram que o biochar também pode controlar patógenos de plantas, por apresentar uma variedade de compostos orgânicos que podem individualmente ou combinados suprimir ou estimular microrganismos habitantes do solo.

Araújo (2023) testou a produção de biochar da partir do lodo gerado em uma estação de tratamento de esgoto localizada no Distrito Federal através de pirólise e verificou que é possível utilizar o biochar sintetizado do lodo no controle de fungos patogênicos no solo.

Keherwald (2021) também testou a produção de biochar com o lodo da ETE do Gama, também no Distrito Federal, e concluiu que biochar produzido a partir do lodo de esgoto pirolisado a 300°C e a 500°C demonstraram capacidade de fornecer fósforo disponível no solo e que o biochar produzido em temperaturas mais elevadas (500 °C) foi ainda mais eficiente para aumentar a absorção de fósforo pelas plantas de milho.

Um ponto de atenção com relação a pirólise do lodo de esgoto é a geração de hidrocarbonetos aromático policíclico (HPA) que são compostos de baixa hidrossolubilidade, potencialmente carcinogênicos (SHIMADA, 2006; TARANTINI et al., 2011).

3.4.6.5 Compostagem de lodo

Inácio e Miller (2009) definiram a compostagem como uma técnica de tratamento de resíduos orgânicos constituída de práticas que promovem a decomposição biológica em temperaturas termofílicas (entre 55°C e 75°C).

Após a aplicação da compostagem a matéria orgânica, o nitrogênio e o fósforo presentes no lodo podem ser utilizados como fertilizante orgânico para melhorar a qualidade do solo (ZHEN et al., 2017). Porém, como mencionado anteriormente, o lodo contém patógenos e por isso, aplicá-lo diretamente no solo pode conferir um risco a saúde pública. A compostagem representa uma alternativa para viabilizar o reuso agrícola do lodo de esgoto, pois através dela, é possível eliminar ou diminuir essa concentração de patógenos, pela ação de microrganismos, fazendo com que o composto formado atinja os níveis exigidos pela legislação (RIBEIRO, 2018).

Apesar de requerer condições ideais de temperatura, pH, oxigênio, microrganismos, umidade, relação C/N e granulometria para evitar problemas como a geração de maus odores, a proliferação de vetores e contaminação de doenças (KIEHL, 2004, INÁCIO; MILLER, 2009), a compostagem é uma técnica relativamente simples, segura e de baixo custo.

Além de ser uma alternativa para desinfecção do lodo, a compostagem pode representar uma fonte de receita acessória aos operadores de saneamento, caso se mostre viável tecnicamente, tenha a qualidade requerida pelos produtos agrícolas, e haja um trabalho de conscientização dos possíveis clientes com relação às vantagens desse produto.

No Brasil, fertilizantes passaram a ser produzidos comercialmente a partir da compostagem do lodo de esgoto, gerando os compostos, também chamados de fertilizantes orgânicos classe B. O fertilizante orgânico classe B é, de acordo com a IN SDA Mapa nº 61/2020, que revoga a Instrução Normativa N° 25 de 23/07/2009, produto que utiliza, em sua produção, quaisquer quantidades de matérias-primas orgânicas geradas nas atividades urbanas, industriais e agroindustriais, incluindo a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional, lodos gerados em estações de tratamento de esgotos, lodos industriais e agroindustriais gerados em sistemas de tratamento de águas residuárias contendo qualquer quantidade de

despejos ou contaminantes sanitários, todos com seu uso autorizado pelo órgão ambiental, resultando em um produto de utilização segura na agricultura. (BRASIL, 2020). Nos Estados Unidos o reuso na agricultura é a via dominante de disposição de lodo. Aproximadamente 60% da produção anual de 17,8 milhões de toneladas métricas de lodo (seco peso) de 16.000 ETEs nos Estados Unidos é convertido em biossólidos e usado como fertilizante agrícola (SPINOSA, 2011).

A Portaria nº 52/2021, em seu artigo segundo, definiu compostagem e composto orgânico como:

Art. 2º

[...]

VI – compostagem: processo de decomposição onde microrganismos agindo em condições adequadas de temperatura e umidade, transformam a matéria orgânica de origem animal ou vegetal e suas misturas em fertilizante natural para o solo, ao mesmo tempo em que reduz a presença de agentes patogênicos e sementes de invasoras eventualmente presentes na matéria-prima, podendo ser enriquecido com minerais ou agentes capazes de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas, autorizadas neste Regulamento Técnico;

VII – composto orgânico: produto obtido por processo de compostagem; [...] (BRASIL, 2021, online).

Isoladamente o lodo de esgoto não possui todas as características necessárias para ser compostado. É preciso misturá-lo com outro tipo de resíduo, com características complementares, de forma que a mistura sim apresente as condições ideais para garantir a boa performance do processo de compostagem. Esses outros resíduos, chamados de agentes estruturantes, têm a função de conferir integridade estrutural à mistura a ser compostada, além disso, o material estruturante confere porosidade à massa, e assim, garante o fluxo de ar (passivo ou ativo) durante o processo de compostagem (INÁCIO; MILLER, 2009). No caso da compostagem do lodo, o agente estruturante também tem a função de absorver o excesso de umidade e equilibrar a relação de carbono e nitrogênio (C/N) da mistura (FERNANDES; SILVA, 1999). Geralmente, esses resíduos são: serragem, resíduos de poda, corte de grama, e são adicionados durante o processo de compostagem.

Mesmo sendo considerado seguro, há restrições de uso para o composto de lodo de esgoto: é proibido em pastagens, no cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, nas culturas inundadas e nas demais culturas cuja parte comestível entra em contato com o solo (BRASIL, 2009). Entretanto, este pode ser utilizado como fertilizante para

espécies florestais destinadas à produção de madeira e celulose, por exemplo, tendo como potenciais vantagens a diminuição das descargas de lodo em aterros sanitários, incineradores, mares e corpos de água, a ciclagem dos nutrientes, o aporte de matéria orgânica no solo, e a possibilidade de redução de custos com o uso de fertilizantes minerais (AFÁZ et al., 2017).

Segundo a *Environment Protection Agency* (EPA, 2015) a compostagem de resíduos orgânicos é um forte aliado na redução de emissão de gases do efeito estufa, principalmente por 3 motivos: redução do consumo de energia nas indústrias, redução de emissão direta pela incineração, e redução de emissão de metano em aterros sanitários.

Liu et al. (2013) realizaram um inventário de ciclo de vida para investigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) de seis cenários envolvendo várias tecnologias de tratamento de lodo e estratégias de descarte, e sugeriram que os governos devem promover o uso de lodo compostado como fertilizantes orgânicos. O método de compostagem é o de menor impacto ambiental devido ao uso tangível de nutrientes como energia, nitrogênio e fósforo no lodo, que reduz efetivamente a emissão de gases de efeito estufa, como CO₂ e CH₄ (TEOH E LI, 2020).

3.5 MÉTODOS DE COMPOSTAGEM DE LODO

A compostagem pode produzir 1.200 toneladas de matéria orgânica por 5.500 toneladas de lodo tratado, ou seja, 0,21 toneladas de fertilizante por tonelada de lodo (HAN et al. 2021). Considerando a população brasileira atual, de aproximadamente 215,355 milhões de habitantes (IBGE, 2022), e o fato de cada cidadão gerar cerca de 50g de lodo por dia, a compostagem pode impedir que cerca de 2.261 toneladas de lodo, por dia, sejam destinadas inadequadamente, ou em aterros sanitários, emitindo gases prejudiciais ao meio ambiente. Para isso, existem várias técnicas, que precisam ser bem aplicadas e diversos aspectos a serem monitorados a fim de produzir um composto de qualidade.

Paredes Filho (2011) observou que experimentos utilizando restos vegetais e lodo apresentaram aumentos de temperatura até alcançar a fase termófila, o que promove a eliminação de agentes patogênicos presentes no lodo, se mantida por um período

compatível. Como explicado na sessão anterior, para se fazer a compostagem, deve-se misturar o lodo com resíduos estruturantes (restos vegetais picados, palha, bagaço de cana etc.). Recomenda-se que esse material seja picado em pedaços de 0,5 a 4,0 cm, para permitir boa aeração, fundamental para a atividade dos organismos, que depende também de boa umidade, entre 55 e 65%. A atividade microbiana consome nitrogênio na degradação e ressíntese de matéria orgânica. O carbono é retirado dos resíduos estruturantes e o nitrogênio é obtido no lodo. A relação C/N ideal é entre 20 e 30, ou seja, 20 a 30 unidades de Carbono para uma unidade de Nitrogênio. Durante pelo menos 10 dias, a temperatura acima de 60°C deve ser mantida. Quando a atividade biológica diminui, a temperatura também diminui. Nesta fase deve-se revolver a leira do composto para promover a aeração e a mistura dos materiais, o revolvimento também é importante para descompactar e recuperar a porosidade da massa da mistura durante a compostagem, o que influencia positivamente na aeração passiva das leiras ou pilhas (INÁCIO; MILLER, 2009). Feito isto, deve-se controlar diligentemente a temperatura, se o composto aquecer é porque o processo ainda não atingiu à estabilidade. Se a temperatura se mantiver estável, significa que o processo está concluído (ANDREOLI et al., 1999).

Andraus et al. (1999) avaliaram a eficiência da compostagem no processo de desinfecção para redução de *Salmonella*, estreptococos, Coliformes totais e fecais. Os resultados apresentaram uma média de redução para estreptococos de 83%. Os coliformes totais mostraram redução de 72,3% e os fecais, uma redução de 99,8%, dados que demonstram a eficiência da compostagem na remoção das bactérias entéricas presentes no lodo. Assim, a compostagem, realizada nas condições ideais, é bastante útil para remoção de patógenos e apresenta um produto final com características agronômicas adequadas. O composto obtido pode ser utilizado para qualquer tipo de atividade agrícola sem riscos para a saúde humana e animal (Andreoli et al., 1999).

Faria (2018) também avaliou a eficiência da compostagem na eliminação ou redução de microrganismos patogênicos presentes no lodo de esgoto sanitário, e observou que ao final de 45 dias as amostras compostadas apresentaram ausência de *Salmonella spp*, após 60 dias, uma redução de cerca de 85% na concentração de coliformes termotolerantes e de 100% na densidade de ovos viáveis de *Ascaris spp*,

concluindo que a compostagem se mostrou eficaz para higienização do lodo de acordo com as legislações pertinentes.

Os métodos de compostagem podem ser classificados conforme tipo de aeração, grau de revolvimento das leiras, e se é realizado em leiras ou de forma confinada. Há diversas formas diferentes de montar as leiras, e a eficiência do processo de compostagem está totalmente relacionada a forma como as leiras são montadas (INÁCIO; MILLER, 2009). As leiras podem ser:

- **Leiras Estáticas com Aeração Passiva:** As leiras são montadas com paredes retas e não são revolvidas frequentemente, com alta relação C/N e adição periódica de novas cargas de resíduo. A baixa necessidade de capital investido, o custo baixo de operação e manutenção, a disponibilidade de mão-de-obra, a disponibilidade de área, são características que tornam a compostagem em leiras estáticas uma tecnologia com alto potencial de replicabilidade e sustentabilidade para as condições brasileiras.

- **Leiras Estáticas com Aeração Forçada:** Atualmente o método mais utilizado no Brasil. As leiras podem ser mais largas e utiliza equipamentos para insuflação ou aspiração de ar no interior das leiras, a composição dos materiais deve ser observada para conferir porosidade a leira. Materiais como serragem, que apresentam resistência à decomposição e mantém a estrutura da leira durante praticamente todo processo, são usados na compostagem de lodos de esgoto.

- **Compostagem com Revolvimento de Leiras:** normalmente leiras longas e de secção triangulares, uma vez que os resíduos são despejados com o auxílio de pás-carregadeiras. Costumam ter entre 4,0 e 4,5 m de base e 1,5 a 1,8 m de altura. O revolvimento constante das leiras é usado para recuperar a aeração do processo. Necessitam grandes áreas e podem gerar mais chorume e emitir mais odores.

- **Compostagem em Reatores (confinada):** Ocorrem dentro de contêineres ou grandes caixas metálicas ou de concreto, não sofrem muita influência das condições climáticas, mas dependem totalmente de sistemas de aeração forçada e revolvimento. A compostagem em reatores biológicos é um sistema que necessita maior capital, tem maiores custos de operação e manutenção dos equipamentos, mas que pode ser atrativo pelo menor uso de mão-de-obra, menor necessidade de área, controle da qualidade do composto e tempo de compostagem.

De acordo com Inácio e Miller (2009) a qualidade do processo de compostagem pode ser determinada observando os seguintes aspectos: (I) Proliferação de moscas e outros vetores, (II) ocorrência de odores, (III) produção excessiva de chorume, (VI) características favoráveis do produto final.

Os parâmetros físico-químicos fundamentais e que devem ser controlados para o êxito do processo de compostagem são: aeração, temperatura, umidade, relação C/N, estrutura e pH.

O monitoramento dos metais pesados também deve ser observado no controle de qualidade dos lodos e do composto final, porém, a não ser que os esgotos estejam muito contaminados por efluentes industriais, dificilmente esse será um fator limitante para a compostagem e uso agrícola do composto obtido (FERNANDES, 1999).

3.6 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

A Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que dispõe diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, ela foi regulamentada pelo Decreto 10.936, de 12 de janeiro de 2022 e seus principais objetivos são:

- Proteção da saúde pública e da qualidade ambiental estimulando padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços com desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas.
- Não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.
- Gestão integrada dos resíduos sólidos que busca compartilhar a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos, envolvendo todos da cadeia de comercialização, como fabricantes, distribuidores, consumidores e órgãos públicos.
- Incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

- Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.

Completamente aderente à PNRS, a reciclagem agrícola é uma forma de destinação de lodo de grande interesse, uma vez que o material apresenta composição rica em macro e micronutrientes, podendo ser utilizado como fertilizante orgânico (CONTIN et al., 2012). Mas para isso, o lodo gerado deve atender às exigências impostas pelas leis vigentes que regulamentam o uso do lodo de esgoto na agricultura, como níveis máximos de concentração de patógenos e metais pesados, agentes considerados tóxicos ao homem, animais, solo e lençol freático, para evitar contaminação e poluição do ambiente. Essas leis são o Decreto nº 8.384/2014, as Instruções Normativas 27/2006, 25/2009, SDA 7/2016 (MAPA), as Resoluções 481/2017 e 498/2020 (CONAMA).

O Decreto 8.384 de dezembro de 2014 altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o 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 ou biofertilizantes destinados à agricultura.

A Instrução Normativa SDA N° 7 de 12 de abril de 2016, do Ministério de Defesa da Agropecuária do Ministério da Agricultura e do Abastecimento (MAPA) modificou a IN 27/2006 segundo os limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo (Tabela 3).

Tabela 3. ANEXO V da IN SDA N° 7/2016 MAPA

Contaminante	Valor Máximo Admitido
Arsênio (mg.kg ⁻¹)	20,00
Cádmio (mg.kg ⁻¹)	3,00
Chumbo (mg.kg ⁻¹)	150,00
Cromo Hexavalente (mg.kg ⁻¹)	2,00
Mercúrio (mg.kg ⁻¹)	1,00

Níquel (mg.kg ⁻¹)	70,00
Selênio (mg.kg ⁻¹)	80,00
Coliformes Termotolerantes – número mais provável por grama de matéria seca (NMP. 1000 g ⁻¹ de MS)	1.000,00
Ovos viáveis de helmintos – número por quatro gramas de sólidos totais (nº em 4g ST)	1,00
<i>Salmonella sp</i>	Ausência em 10g de matéria seca
Materiais inertes	
Vidros, plásticos, metais < 2mm	0,5% na massa seca
Pedras > 5mm	5,0% na massa seca

Fonte: (IN SDA N° 7/2016)

Em seguida, o MAPA publicou a IN n° 25/2009 que aprovava as 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. De acordo com o artigo 2º, parágrafo IV dessa instrução normativa o composto originado por bio-sólidos foi classificado como:

Classe “D”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura.

O Anexo III dessa instrução normativa apresentava os parâmetros relacionados aos padrões mínimos de qualidade que esse material deveria atender para ser enquadrado nessa categoria. Destacam-se: umidade máxima (50%), carbono orgânico mínimo (15%), nitrogênio total mínimo (0,5%), pH mínimo (6,5), relação C:N máxima (20). Os valores de capacidade de troca iônica (CTC), entre outros nutrientes deveriam ser conforme declarados pelo fabricante, porém era obrigatória sua declaração para registro do produto. Todos os valores expressos em base seca e a umidade determinada a 65° (BRASIL, 2009).

No entanto, a IN n° 25/2009 foi revisada pela IN n° 61/2020, de acordo com essa instrução normativa, o composto que possui em sua composição quaisquer quantidade

de matéria-prima orgânica proveniente de lodo gerados em estações de tratamento de esgoto passou a ser classificado como Classe “B”, e o valor de pH mínimo passou a ser conforme declarado pelo fabricante. Na Tabela 4 é possível verificar as principais alterações realizadas.

Tabela 4. Diferenças entre a IN nº 25/2009 e a IN nº 61/2020

Instrução Normativa	Classificação	Definições
IN nº 25/2009	<p>Capítulo II, art. 2º [...] III – Classe “C”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura; e IV – Classe “D”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura.</p>	<p>Capítulo I, art. 1º [...] III – Composto de lixo: produto obtido pela separação da parte orgânica dos resíduos sólidos domiciliares e sua compostagem, resultando em produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos parâmetros estabelecidos no Anexo III e aos limites máximos estabelecidos para contaminantes; Capítulo I, art. 2º [...] V – Compostagem: processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem.</p>
IN nº 61/2020	<p>Seção I, art. 3º I – Classe “A”: produto que utiliza, em sua produção, matéria-prima gerada nas atividades extrativas, agropecuárias, industriais, agroindustriais e comerciais, incluindo aquelas de origem mineral, vegetal, animal, lodos industriais e agroindustriais de sistema de tratamento de águas residuárias com uso autorizado pelo órgão ambiental, resíduos de frutas, legumes, verduras e restos de alimentos gerados em pré e pós-consumo, segregados na fonte geradora e recolhidos por coleta diferenciada, todos isentos de despejos ou contaminantes sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura; e II – Classe “B”: produto que utiliza, em sua produção, quaisquer quantidades de matérias-primas orgânicas geradas nas atividades urbanas, industriais e agroindustriais, incluindo a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos da coleta convencional, lodos gerados em estações de tratamento de esgotos, lodos industriais e agroindustriais gerados em sistemas de tratamento de águas residuárias contendo qualquer quantidade de despejos ou contaminantes sanitários, todos com seu uso autorizado pelo órgão ambiental, resultando em produto de utilização segura na agricultura. Parágrafo único. Podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de fertilizante orgânico Classe “A”, os resíduos provenientes de serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos desde que estes serviços contemplem a segregação na fonte geradora e a coleta diferenciada de resíduos em, no mínimo, três frações: resíduos orgânicos, resíduos</p>	

recicláveis e rejeitos, evitando qualquer tipo de contaminação sanitária.

Fonte: (TRIVELLA, 2022).

Em 2021, o Mapa publicou a Portaria Mapa nº 52/2021 que reorganiza o regulamento técnico para os sistemas orgânicos de produção e revoga as normativas anteriores, centralizando-as em um único documento. Nessa nova redação, pela primeira vez na história da agricultura orgânica brasileira, o uso de compostos provenientes de resíduos orgânicos domésticos, resíduos de alimentos oriundos de comercialização, preparo e consumo em estabelecimentos comerciais e industriais desde que oriundos de coleta seletiva e bioestabilizados, é permitido, contando que seu uso e manejo não causem danos à saúde e ao meio ambiente (BRASIL, 2021), sem a restrição de uso abordada nas INs anteriores (TRIVELLA, 2022).

Entretanto, Trivella reafirmou que, seu uso irrestrito se dá em uma condição geral, ou seja, que utilize matéria-prima oriunda de sistemas de produção orgânicos. Quando considerada a matéria-prima com origem de sistemas não orgânicos, a restrição “permitidos desde que não usado diretamente nas partes aéreas comestíveis” permanece. Além do mais, nessas condições, é exigido que o uso desse produto seja autorizado pelo Organismo da Avaliação da Conformidade ou Organização de Controle Social, mediante realização da análise de risco, sujeita ao monitoramento dos limites de contaminantes exigidos pelo Anexo VI (Tabela 5) dessa mesma Portaria (2022).

Tabela 5. Anexo VI Portaria Mapa nº 52/2021

Elemento	Limite
Arsênio	20 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Cádmio	0,7 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Chumbo	45 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Cobre	70 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Cromo hexavalente	0,0 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Cromo total	70 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Mercúrio	0,4 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Níquel	25 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Selênio	80 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Zinco	200 mg.kg ⁻¹ de matéria seca
Coliformes	1.000 NMP.g ⁻¹ de MS (número mais provável por grama de matéria seca)
termotolerantes	< 1.000 UFC. 1000 g ⁻¹ ou ml (Unidade Formadora de Colônia por grama ou mililitro de produto formulado)**
Ovos viáveis de helmintos	1 em 4g ST (em 4 gramas de sólidos totais)
<i>Salmonella sp</i>	Ausência em 10g de matéria seca Ausência em 25g ou 25ml de produto formulado**

*Aplicado para compostos orgânicos, resíduos de biodigestor, resíduos de lagoa de decantação e fermentação, excrementos oriundos de sistema de criação com o uso intenso de alimentos e produtos obtidos de sistemas não orgânicos e, quando indicado, para produtos registrados com a denominação de “PRODUTO FITOSSANITÁRIO COM USO APROVADO PARA A AGRICULTURA ORGÂNICA”.

** No caso de coliformes termotolerantes e *Salmonella* sp: limite exigido para produtos registrado com a denominação de “PRODUTO FITOSSANITÁRIO COM USO APROVADO PARA A AGRICULTURA ORGÂNICA”, formulados à base de agentes microbiológicos de controle.

Fonte: (Portaria Mapa nº 52/2021)

No estado de São Paulo há ainda, a norma P.4230, da CETESB (2021), que estabelece os critérios de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas, classifica o lodo de esgoto quando à presença de patógenos, em Classe A e B. O lodo classe A é aquele que atende os seguintes critérios: densidade de coliformes fecais inferior a 10^3 NMP.(g de sólidos totais)⁻¹ e densidade de *Salmonella* sp. inferior a 3 NMP.(4g de sólidos totais)⁻¹. O lodo é considerado classe B quando a densidade de coliformes fecais for inferior a 2.10^6 NMP.(g de sólidos totais)⁻¹. No caso do estado do Paraná, a norma do IAP (Instituto Ambiental do Paraná) estabelece limites para ovos de helmintos (>1.g⁻¹) que são mais resistentes e de grande importância para a saúde pública brasileira.

A norma P4.230 da CETESB (2021), estabelece limites máximos para *Escherichia coli* e Organismos patogênicos, os quais são apresentados na Tabela 6. Além destes limites, a norma também estabelece a taxa máxima de aplicação anual de metais em solos agrícolas tratados com lodo e a carga máxima acumulada de metais pela aplicação do lodo.

Tabela 6. Limites máximos para *Escherichia coli* e organismos patogênicos

Etapas do licenciamento ambiental da UGL	Parâmetro	Limite Máximo Permitido
	<i>Salmonella</i>	Ausência em 10g de ST ⁻¹
	Ovos Viáveis de Helmintos	<0,25 ovo.(g de ST) ⁻¹
Verificação	Vírus Entéricos ²²	<0,25 UFP ou UFF.(g de ST) ⁻¹
	<i>Escherichia coli</i>	10^3 NMP.(g de ST) ⁻¹
Operação	<i>Escherichia coli</i>	10^3 NMP.(g de ST) ⁻¹

Fonte: CETESB (2021)

Tabela 7. Valores máximos de aporte de substâncias químicas de interesse, admissíveis no solo pela aplicação de lodo

Substância química de interesse	Valor máximo admissível (kg.ha ⁻¹)
Arsênio	39
Bário	312
Cádmio	3,3
Chumbo	187
Cobre	156
Cromo	195
Mercúrio	1,3
Molibdênio	13
Níquel	78
Selênio	3,1
Zinco	223

Fonte: CETESB (2021)

Apesar de diferentes órgãos governamentais desenvolverem esses regulamentos, observa-se que há diálogo entre os instrumentos legais apresentados, fato que resulta em uma estrutura com enorme potencial para tornar possível a economia circular da reciclagem do lodo, e demais resíduos sólidos orgânicos, por meio da compostagem.

3.7 DEMANDA POR FERTILIZANTES NO BRASIL

Na agricultura, cada vez mais, faz-se necessária a busca de fontes alternativas de fertilizantes para diminuir os custos de cultivos e trazer mais opções aos produtores, adequando assim a exploração dos recursos naturais (VAZ; GONÇALVES, 2002).

Anualmente o Brasil gasta mais de 30 milhões de toneladas de fertilizantes sintéticos no adubo das lavouras. O fertilizante, por sua vez, é um insumo dependente do mercado externo, o país não é autossuficiente em sua produção. Segundo a Associação

Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) foram entregues ao mercado 34.438.840 toneladas em 2017. Desse total, mais de 76% foi importado.

Além disso, boa parte dos insumos sintéticos são derivados do petróleo. Além do impacto ambiental da extração de petróleo, há também o impacto econômico. Dados da ANDA apontam que a importação desses insumos respondeu por quase 25% do déficit de US\$ 8 bilhões na balança comercial de produtos químicos em 2005 (DIAS; FERNANDES, 2006). Em 2015, o Brasil importou mais de 21 milhões de toneladas de fertilizantes (RIBEIRO; LEITE, 2017).

Existem restrições quanto a aplicação de fertilizante oriundo de lodo de esgotos em algumas culturas, como em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas, cuja parte comestível entre em contato com o solo. Mas essas culturas não são as de maior demanda de fertilizante no país (BRASIL, 2009). O Brasil tem 9,85 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 75,2% de eucalipto e 20,6% de pinus, mostra o levantamento da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

A Tabela 8 revela a demanda por adubo das principais culturas do Brasil, que podem receber o fertilizante orgânico classe B.

Tabela 8. Demanda por adubo orgânico das principais culturas cultivadas no Brasil

Tipo de Cultura	Adubo (t.ha ⁻¹)	Área (ha)	Adubo Total (t)
Café	9,3	1.283.997	11.941.172
Laranja	4	519.549	2.078.196
Eucalipto	0,9	740.720.000	666.648.000
Cana-de-açúcar	0,15	9.127.645	1.396.147

Fonte: IBGE (2017); Embrapa (2017)

3.8 VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

A análise de viabilidade econômico-financeira compara os custos e investimentos demandados com os benefícios esperados, avaliando a viabilidade e atratividade do projeto (VERAS, 2001, COYLE et al., 2003, OCNEANU; BUCSA, 2014), por isso é algo fundamental para o sucesso de qualquer empreendimento. Recomenda-se que no estudo de análise de investimentos, a proposta seja submetida às diferentes taxas de descontos, taxas estas definidas a partir daquelas obtidas em opções de investimentos

disponíveis no mercado. Ou seja, a escolha das taxas de desconto é definida em cima da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) determinada pelo investidor. E, a partir do fluxo de caixa planejado para o empreendimento pode-se então calcular os indicadores econômicos de rentabilidade: Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

O método do Valor Presente Líquido (VPL) visa valorar em termos de valor presente o impacto dos eventos futuros associados a um projeto ou alternativa de investimento, em outras palavras, o VPL traz a valor presente os fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil (SAMANEZ, 2005). Silva et al. (2005), definiu o VPL como a diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos investimentos e custos. Um projeto é considerado viável se o fluxo esperado das receitas ou a economia gerada com o investimento, for superior ao das despesas, ou seja, o VPL deve ser maior do que zero.

Gitman (1984) definiu a Taxa Interna de Retorno (TIR), como a taxa de desconto que leva o valor atual das entradas de caixa, ou receitas, a se igualarem ao investimento inicial de um determinado projeto. Para fins de tomada de decisão, ao se aceitar ou recusar uma proposta de projeto, é necessário efetuar o comparativo entre a TIR, que deve ser superior ao custo de capital. Essa aceitação deve garantir que se está obtendo mais que o retorno exigido, assegurando assim a atratividade da proposta.

A TIR é a taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas ao valor presente dos investimentos e custos, ou seja, iguala o VPL a zero. A TIR representa a rentabilidade obtida do capital durante todo o horizonte temporal aplicado, ou seja, relaciona o capital investido ao capital resgatado no fim do projeto (ROSS et al., 2010). A TIR também pode ser entendida como a taxa percentual do retorno do capital investido (SILVA et al., 2005). O projeto é considerado viável, em relação à TIR, quando esta for superior à taxa mínima de atratividade do projeto. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é uma taxa de juros, que demonstra o mínimo que o investidor pretende ter de retorno ao fazer um investimento, ou seja, é a taxa mínima que o investidor espera receber como retorno do seu capital investido. No caso de um investimento gerar uma TIR menor que a TMA, o projeto não é atrativo para investimento (PIRES, 2011). Na comparação entre projetos com mesma duração, o

melhor será aquele que apresentar a maior TIR, ou seja, a maior rentabilidade financeira.

O *payback* descontado é um indicador, que define o tempo necessário para o investidor recuperar o capital investido (BESERRA, 2016). A partir dos resultados obtidos é possível concluir se o investimento realizado será recuperado no curto, médio ou longo prazo (GASPAR, 2019).

3.9 GREEN BONDS

O desenvolvimento da sociedade marcado pelo avanço da globalização e pela revolução industrial trouxe um novo problema para o mundo moderno: a degradação contínua do meio ambiente marcada por desmatamento, poluição dos corpos hídricos e a geração de resíduos sólidos numa proporção maior do que se pode destinar adequadamente. Diante disso, tornou-se imperativo discutir medidas para frear ou minimizar os impactos ambientais (REIS, 2005).

Empresas multinacionais passaram a se posicionar como ecologicamente responsáveis, executando ações direcionadas à preservação e recuperação do meio ambiente, obtendo, por isso, incentivos financeiros para investirem em projetos destinados à área ambiental (FORBES, 2021). Esse movimento foi impulsionado pelo surgimento de um novo tipo de investidor, que não visa apenas com o retorno financeiro de seus negócios, mas que também demonstra interesse em garantir ações sustentáveis na execução de seus investimentos (MAGALHÃES, 2020).

E foi assim que nasceram os chamados *Green Bonds* ou títulos verdes, cujo valor arrecadado é totalmente investido em projetos ligados à sustentabilidade. No Brasil, a primeira emissão, foi feita pela Brasil Foods (BRF), no ano de 2015 (MAGALHÃES, 2020). No primeiro semestre de 2021 já haviam sido arrecadados mais de R\$ 55 bilhões apenas por títulos verdes no país, o que ainda é um valor baixo se comparado ao arrecadado no exterior no mesmo período (ADACHI, 2021).

É válido inferir que o investimento em ações sustentáveis, não pode ser avaliado apenas através dos indicadores econômico-financeiros tradicionais. Visto que, toda companhia de saneamento tem como objetivo realizar grandes volumes de

investimentos em saneamento básico, muitas vezes em curtos e médios prazos, e para isso é necessário visar a obtenção de recursos (WERNER, 2021), logo apostar em ações que facilitem a obtenção de títulos verdes pode representar uma boa estratégia.

3.10 Políticas Públicas

Compostas por ação, coordenação, processo e programa, as políticas públicas extraem a atuação do Estado na elaboração de metas, definição de prioridades, levantamento dos custos e meios de execução para a consecução dos compromissos constitucionais, que se concretiza em arranjos institucionais (NUNES, 2020). Arranjos institucionais podem ser definidos como o conjunto de iniciativas e medidas articulados por suportes e formas jurídicos diversos (BUCCI, 2006).

Em síntese políticas públicas são formas de atuação do governo com o objetivo de promover fundamentos constitucionais estabelecidos a fim de coordenar os meios à disposição do Estado e das atividades privadas (BOFF, 2021), são instrumentos capazes de proporcionar, mediante a ação conjunta dos poderes públicos, a efetivação de direitos fundamentais sociais (BUCCI, 2006).

Analisando as leis voltadas ao saneamento básico, amplamente citadas neste trabalho, às luzes da definição de políticas públicas, pode-se concluir que o evidente atraso em seus cumprimentos se relaciona à falta de políticas públicas bem formuladas que viabilizem a concretização das metas estabelecidas nesses instrumentos legais. Logo, é necessário o estabelecimento de políticas públicas que associem as atividades privadas, em seus mais diversos setores, de forma a conectar interesses econômicos aos padrões de sustentabilidade requeridos pelo meio ambiente e já dispostos na constituição federal.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Localizada no município de Atibaia, no estado de São Paulo, a Estação de Tratamento de Esgotos Estoril, possui a tecnologia lodos ativados por batelada sequencial e gera em torno de 40 a 60 toneladas de lodo por mês. A estação passará por um processo de retrofit e modernização que irá alterar seu processo de tratamento para fluxo contínuo, o que aumentará a geração de lodo para cerca de 300 toneladas por mês.

Atualmente o lodo gerado na estação passa por um processo de desidratação por centrifugação para atingir por volta de 80% de umidade, é então depositado em caçambas e destinado ou em aterro sanitário licenciado localizado em Guarulhos, a 52 km de distância da ETE, ou em um Centro de Compostagem, igualmente licenciado, localizado no município de Jundiaí, à 62 km de Atibaia. Devido à distância, os custos com a destinação adequada do lodo representam um dos maiores da operação. Com o aumento de quase 500% na geração desse resíduo se tornou imprescindível a busca por novas alternativas economicamente viáveis e ambientalmente adequadas para destiná-lo.

Conhecida como a cidade das flores e dos morangos, a cidade de Atibaia tem orgulho da beleza ocasionada pelos cuidados intensivos com seus canteiros repletos das mais lindas e coloridas flores, que atraem turistas de todo o país. Esses cuidados geram resíduos de poda que precisam ser devidamente destinados. O cultivo das mudas de flores, por sua vez, demanda adubação.

A aplicação da compostagem associa às necessidade da ETE de Atibaia, ao contexto sustentável do município e apresenta uma solução conjunta, para a destinação do lodo de esgoto e do resíduo de poda da cidade, além de oferecer uma alternativa de fertilizante sem custo aos pequenos produtores de flores da região.

5. METODOLOGIA

Este estudo foi dividido em 3 etapas primeiramente (i) foram realizados ensaios de laboratório para identificar se o lodo gerado na ETE Atibaia e o resíduo de poda da cidade apresentam características físicas e químicas e microbiológicas apropriadas para o processo de compostagem, e definir qual a melhor proporção para a formação do composto, posteriormente (ii) foi realizado teste piloto para verificar o resultado dos testes de laboratório, e então (iii) o estudo de viabilidade econômico-financeira dessa forma de destinação do lodo, a fim de conhecer o impacto financeiro no fluxo de caixa da empresa, visando a redução de custos operacionais de produção e melhoria da rentabilidade financeira.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A fim de estabelecer os critérios a serem adotados no processo de compostagem do lodo da ETE de Atibaia foram realizadas algumas análises laboratoriais e estudos conforme segue:

- 1- Caracterização do lodo de esgoto quanto aos parâmetros: série de sólidos; teores de C-total, N-total, relação C/N, valores de pH, condutividade elétrica, contaminantes: As, Cd, Pb, Cr, Hg, Ni, Se, Ba, Cu, Mo, Zn e patógenos (coliformes totais e *E. coli*, e *Salmonella sp*);
- 2- Caracterização dos materiais estruturantes: poda de árvore e aparas de gramas: teor de umidade; teores de C-total, N-total, relação C/N;
- 3- Ensaio de respirometria visando obtenção de percentual de material estruturante e de lodo de esgoto adequados para processo de decomposição, de modo a obter o maior volume de lodo compostado e menor volume possível de material estruturante necessário para o processo (CETESB, 1990).

Foram realizadas duas coletas de lodo de esgoto na ETE de Atibaia, uma no dia 03/08/2021 e a outra no dia 18/11/2021. As amostras simples do lodo de esgoto foram homogeneizadas e quarteadas até atingir aproximadamente 200g. Nos materiais *in natura* foram determinados os valores de pH em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (1:5, m:v), e os valores de condutividade elétrica em água (1:10, m:v). A série de sólidos foi determinada, iniciando-se pela determinação do teor de umidade das amostras após secagem em estufa com circulação forçada mantida por 48 horas a 65°C . Posteriormente, o material foi seco a 110°C até peso constante, determinando-se o teor de sólidos da amostra, e prosseguiu-se com a combustão em mufla (550°C , por 01 hora) para determinação dos teores de sólidos voláteis (matéria orgânica) e sólidos fixos ou cinzas. Tais análises foram conduzidas de acordo com Andrade & Abreu (2006). O material seco a 65°C foi moído e foram realizadas análises dos teores de carbono pelo método de Walkley & Black (1934), e nitrogênio pelo método Kjeldhal e ambos determinados por titulometria. Amostras *in natura* dos lodos de esgoto foram coletadas e armazenadas em saco estéril de polietileno, conservados a 4°C até a chegada no laboratório, e imediatamente realizou-se seu processamento para quantificação de coliformes totais, fecais, *Salmonella sp*, de acordo com metodologia da USEPA (2003).

Os materiais estruturantes, poda de árvore e aparas de gramas também foram coletados em dois momentos diferentes, a primeira amostra no dia 18/11/2021 e a segunda amostra no dia 03/03/2022, e também, foram caracterizados quanto aos teores de água, carbono, nitrogênio, para realização de uma pré-compostagem desses resíduos urbanos para uso em canteiros da cidade, de modo a equilibrar a relação C/N, e usá-los sem que causem desequilíbrio na fertilidade dos solos dos canteiros urbanos. Os materiais vegetais utilizados foram igualmente secos e moídos, determinando-se o teor de umidade, os teores de C-total (Walkley & Black, 1934) e N-total (Sarruge & Haag, 1974). As análises, cálculos e modo de confecção e condução das pilhas de compostagem encontram-se nas Tabelas de 14 a 17.

Posteriormente, foi conduzido um ensaio de respirometria do lodo da ETE de Atibaia e da poda de árvore, de modo a determinar qual a melhor proporção de lodo:poda, promovendo a maior taxa de decomposição em menor período de tempo, reduzindo assim a dependência de elevado volume de material estruturante e menor tempo de uso de pátio de compostagem e insumos como, horas máquina e horas homem. O comportamento da respiração da amostra é considerado um indicador da sua atividade microbiana e do efeito de toxicidade e biodegradação de compostos orgânicos adicionados ao solo. O teste de respirometria foi realizado de acordo com o método proposto pela Norma CETESB L6.350 (CETESB, 1990) modificado, que consiste na captura de CO₂ liberado pelos microrganismos decompositores, por uma solução alcalina de NaOH de concentração conhecida, cuja condutividade foi medida diariamente de acordo com Rodella e Saboya (1999). O teste foi conduzido por 90 dias, até a estabilidade das leituras de condutividade elétrica, em delineamento casualizado, com 07 tratamentos, descritos na Tabela 9, e 03 repetições cada tratamento, totalizando 21 respirômetros. A partir da caracterização dos materiais, realizou-se as misturas, partindo de uma relação C/N da mistura de 30:1, e teor de umidade de 50%. Dentro dos respirômetros com as misturas de lodo e materiais estruturantes foram adicionados frascos menores contendo solução de NaOH de concentração conhecida e, os frascos foram incubados em câmaras de BOD \pm a $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Periodicamente, foi feita a troca dos frascos contendo a solução de NaOH e realizado o revolvimento da massa de material, monitorando a perda de água das misturas por meio da pesagem dos frascos. A determinação do CO₂ liberado foi feita diariamente por meio das leituras de

condutividade elétrica da solução de NaOH, medida de acordo com Rodela & Saboya (1999) até a estabilização das leituras por 03 dias consecutivos (Figura 1).



Figura 1. Ensaio de Respirometria

Tabela 9. Tratamentos utilizados no ensaio de respirometria com a mistura de materiais lodo de esgoto e poda de árvore triturada

Tratamentos	Relação C/N mistura	% na mistura
Lodo + açúcar - Controle	30:1	33,0% lodo + 67,0% açúcar
Lodo + poda de árvore	30:1	88,5% poda + 11,5% lodo
Lodo + poda de árvore	27:1	82,1% poda + 17,9 % lodo
Lodo + poda de árvore	25:1	77,3% poda + 22,7% lodo
Lodo + poda de árvore	24:1	75,0% poda + 25,0% lodo
Lodo + poda de árvore	20:1	63,0 % poda + 37,0% lodo
Lodo + poda de árvore	16,5:1	50,0% poda + 50% lodo

Os resultados de C-CO₂ liberado foram ajustados conforme o tempo de incubação, através da equação de cinética química de primeira ordem (LATHAM, 1974) a fim de estimar os parâmetros indicativos da quantidade de carbono potencialmente degradada e a velocidade de degradação das misturas (Equação 1). Depois de ajustados os resultados foram submetidos à análise estatística através do teste de Tukey a 5%, com o uso do programa de análise estatística R (versão 2.15.1).

$$C_{\text{degradado}} = C_0 \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (1)$$

Em que:

$C_{\text{degradado}}$: a quantidade de C em mg liberada na forma de CO_2 durante o tempo de realização do ensaio;

C_0 : a quantidade de C em mg potencialmente degradável e liberado na forma de CO_2 , durante o teste;

k: a constante de velocidade de degradação do carbono orgânico em dia^{-1} ;

t: o tempo em dias.

A partir da estimativa dos parâmetros acima descritos, foi possível calcular o tempo de meia vida ($t_{1/2}$), tempo em dias, necessário para que 50% do valor estimado para C_0 fossem liberados, no processo de degradação do material orgânico de cada tratamento. Os dados de cada parâmetro foram submetidos ao teste de análise de variância e Tukey (5%) para comparação das médias.

5.2 ENSAIO PILOTO DE COMPOSTAGEM

O projeto piloto de compostagem do lodo da ETE de Atibaia foi dividido nas seguintes etapas:

1- Montagem e condução das pilhas de compostagem, com monitoramento diário de temperaturas das pilhas, revolvimento, irrigação e coleta de amostras para avaliação do processo de compostagem. Foram montadas 02 pilhas de compostagem com cerca de 10 toneladas de lodo em cada;

2- Coleta de amostras a cada 15 dias durante os primeiros 60 dias do processo com realização das análises: série de sólidos; teores de C-total; N-total; relação C/N; valores de pH, condutividade elétrica, ovos de helmintos, coliformes totais e *E. coli*, *Salmonella sp.*;

3 – Coleta final das amostras após a fase de maturação para obtenção dos resultados finais.

5.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Nesta etapa foi realizada a caracterização do processo de destinação do lodo de esgoto pela empresa e as possibilidades de destinação ambientalmente correta. Realizou-se o levantamento de informações para elaboração da planilha de custos e, posteriormente a realização da análise da viabilidade econômica do processo de compostagem: equipamentos, recursos humanos e insumos necessários e o comparativo com as formas de destinação atualmente utilizadas pela companhia, a fim de verificar se a compostagem, além de ser uma alternativa sustentável se mostra viável economicamente.

Foram analisados 3 cenários, no qual o primeiro comparou os custos operacionais e de investimentos necessários para a disposição do lodo de esgoto em Aterro Sanitário. O segundo cenário comparou os mesmos custos operacionais com a disposição em um Centro de Compostagem terceirizado, destinado ao tratamento e destinação do lodo de esgoto de forma sustentável. No terceiro cenário, propôs-se o

tratamento do lodo de esgoto na própria unidade de geração, pelo método da compostagem, para a produção de adubo orgânico. Na caracterização dos cenários, foram considerados a geração mensal de 100 toneladas de lodos provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos avaliada, a utilização da área da própria ETE para realização do processo de compostagem, e os custos com análises laboratoriais foram orçados com laboratório terceirizado. Não foi considerado aumento de quadro de colaboradores para realização do processo de compostagem, esse foi conduzido pelos próprios operadores da ETE, foi considerada apenas a inclusão de um operador de retroescavadeira dedicado, e a locação de uma nova retroescavadeira, praticando os mesmos preços já ofertados pelo fornecedor contratado da Concessionária, já incluso o combustível. Para ambos os cenários, foi considerado um horizonte temporal de 20 anos de exploração da atividade, tendo em vista o prazo remanescente do Contrato de Concessão da ETE. Os custos foram corrigidos anualmente pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, produzido contínua e sistematicamente pelo Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor – SNIPC, a fim de medir a inflação de um conjunto de produtos e serviços comercializados no varejo (IBGE, 2021).

Foi realizada a análise de investimentos, neste caso a metodologia proposta é a recomendada por Blank e Tarquin (2008) e os preços foram cotados junto aos fornecedores no ano de 2021. Foram considerados custos com: sondagem do terreno, contratação de consultoria especializada para conduzir a implantação, análises laboratoriais preliminares para determinação das características físico-químicas e microbiológicas dos componentes e especificação da mistura que originaria o composto, obtenção de licença de operação junto ao órgão competente, e aquisição de equipamentos e materiais necessário. A partir das informações coletadas, da caracterização e da quantificação da unidade de compostagem instalada na ETE, foram construídas as planilhas eletrônicas, utilizando a ferramenta Microsoft-Excel®.

O fluxo de caixa foi montado a partir dos custos levantados para investimento ou *Capex*, sigla da expressão inglesa *Capital Expenditure*, definida como Despesas de Capital ou Investimentos em Bens de Capitais e custos de operação ou *Opex*, sigla do termo em inglês *Operational Expenditure*, que significa os gastos totais com as atividades rotineiras, como despesas tributárias, custos com funcionários, manutenção de máquinas e equipamentos, serviços de terceiros, contas, e outros custos da unidade de compostagem, durante o período de 20 anos.

De posse do fluxo de caixa foi possível realizar a análise da viabilidade econômico-financeira e a determinação dos indicadores econômicos de rentabilidade, o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), conforme metodologia descrita por Blank e Tarquin (2008). Buscou-se identificar o tempo de recuperação do capital investido por meio da metodologia do *payback* descontado, proposto por Assaf Neto (1992).

A expressão utilizada para cálculo do VPL é apresentada na equação (2)

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{VF}{(1+r)^t} \quad (2)$$

em que:

VPL = valor presente líquido;

VF = valor do fluxo líquido (diferença entre entradas e saídas);

N = números de fluxos; r = taxa de desconto; t = período de análise (i = 1, 2, 3...)

Como a TIR é a taxa de desconto que iguala o VPL a zero, a mesma pode ser determinada utilizando a seguinte expressão: As metodologias adotadas na presente dissertação constaram das seguintes etapas:

$$VPL = VF_0 + \frac{VF_1}{(1+r)^1} + \frac{VF_2}{(1+r)^2} + \frac{VF_3}{(1+r)^3} + \dots + \frac{VF_n}{(1+r)^n} \quad (3)$$

em que:

F = fluxo de caixa líquido (0, 1, 2, 3,..., n);

r = taxa de desconto.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resultados das análises do lodo de esgoto encontram-se na Tabela 10, indicando valores de pH em água e solução 0,1 mol L⁻¹ de CaCl₂ na faixa de 6,0-6,5, valores compatíveis a lodos gerados em processos de tratamento aeróbicos, e valores de condutividade elétrica variando de 400 a 500,5 μS cm⁻¹, em torno de 50% menores que lodos gerados com esse tipo de tratamento. A amostra de lodo analisada não apresentou *Salmonella sp*, indicando um dado positivo, visto que esse patógeno bacteriano causa infecções gastrointestinais (CHEN et al., 2013). Com relação ao teor de sólidos, a amostra apresentou relação sólido voláteis/sólido totais em torno de 0,72, maior que 0,65, menor valor determinado pela Resolução CONAMA n° 498/2020, que indica fração orgânica estabilizada do lodo, redução da atratividade de vetores e possibilidade de uso direto no solo como lodo classe B. A umidade média foi 80%, C-total 35,0% e 5,0% de N-total (base seca), a relação C/N média foi de 7/1 (Tabela 10). As concentrações de coliformes totais e *E. coli* foram maiores que 10⁶ NMP.(g de ST)⁻¹ (Tabela 10), o que de acordo com o parágrafo 2º do artigo 9º da Resolução Conama n° 498, o classifica como lodo de classe B, ou seja, deve passar por um processo para redução de patógenos (BRASIL, 2020).

Tabela 10. Caracterização físico-química, química e microbiológica do lodo de esgoto

Coleta data	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (μS cm ⁻¹)	Teor H ₂ O (65°C)	Sólidos totais (%)	Sólidos voláteis (MO) (%)	Sólidos fixos (Cinzas) (%)	C (%)	N (%)	C/N	Coliformes totais (NMP.(g de ST) ⁻¹)	<i>E. coli</i> (NMP.(g de ST) ⁻¹)	<i>Salmonella sp</i>
03/08/2021	6,6	6,2	390,5	86,8	12,3	8,9	3,4	36,0	5,6	6,4	>1,3 x 10 ⁶	1,3 x 10 ⁶	Negativo
18/11/2021	6,9	6,4	528,5	76,4	12,2	9,3	2,9	34,4	4,6	7,5	-	-	-

De acordo com os resultados de metais pesados obtidos na análise das amostras de lodo e reportados na Tabela 11, o lodo avaliado atende os limites estabelecidos tanto pela Cetesb P4.230, quanto pela Resolução Conama n° 498, pela qual pode ser classificado como Classe 1, por apresentar resultados bem abaixo dos valores máximos permitidos por essa Resolução.

Tabela 11. Caracterização do lodo de esgoto quanto a presença de metais pesados

Parâmetro	Cetesb P4.230 (mg.kg ⁻¹)	Conama 498 Classe I (mg.kg ⁻¹)	Conama 498 Classe II (mg.kg ⁻¹)	Resultado (mg.kg ⁻¹)
Arsênio	75	41	75	2,26
Cádmio	85	39	85	0,438
Cobre	4300	1500	4300	110
Chumbo	840	300	840	12,3
Mercúrio	57	17	57	0,472
Molibdênio	75	50	75	3,35
Níquel	420	420	420	18,4
Selênio	100	36	100	< 1
Zinco	7500	2800	7500	436

As podas de árvores apresentaram em torno de 46% de umidade, a grama fresca em torno de 40% e a grama seca na faixa de 30%, dados esses que devem ser considerados no uso desses estruturantes no processo de compostagem quando em escala real. O teor de carbono da poda e grama verde foi em torno de 39% e 0,7% de nitrogênio. Para a poda de árvore da primeira coleta, verificou-se um teor de C em torno a 20%, em função do processo já de decomposição que esse material se encontrava. A grama seca apresentou 45% de teor de carbono e aumento de 0,6% no teor de nitrogênio. A grama verde apresentou a maior relação C/N (117:1), e a poda da primeira coleta em torno de 30:1 (Tabela 12).

Tabela 12. Caracterização dos materiais estruturantes

Amostra e data	Teor de H ₂ O (65°C)	C*	N*	C/N
Poda 18/11/2022	47,1	21,4	0,7	30,6
Poda 03/03/2022	46,5	37,878	0,428	88,5
Gramma Verde 03/03/2022	43,4	39,9596	0,3396	117,6
Gramma Seca 03/03/2022	31,2	45,762	0,6192	73,8

* Material seco (65°C)

A Figura 2 ilustra a evolução de CO₂ liberado em cada tratamento ao longo de 03 meses. Observa-se que o período de decomposição para todos os tratamentos foi em torno de 60 dias, posteriormente entrando em fase de estabilização. Na Tabela 13 observa-se que o percentual de decomposição da matéria orgânica e liberação de CO₂ foi maior para o tratamento 25:1, seguido do tratamento 24:1 e 27:1, apresentando-se superiores ao tratamento controle com açúcar, que apresentou taxa de decomposição cerca de 10% menor que os tratamentos com poda de árvore. Contudo, a variação da liberação de CO₂ foi menor que 1% entre os tratamentos com poda de árvore, embora o volume de material estruturante utilizado tenha variado até quase 40%, indicando a possibilidade de redução do volume de estruturante necessário para o processo sem que afete o resultado do processo de decomposição, resultado favorável em cenários de escassez de material estruturante, especialmente nas épocas mais secas do ano.

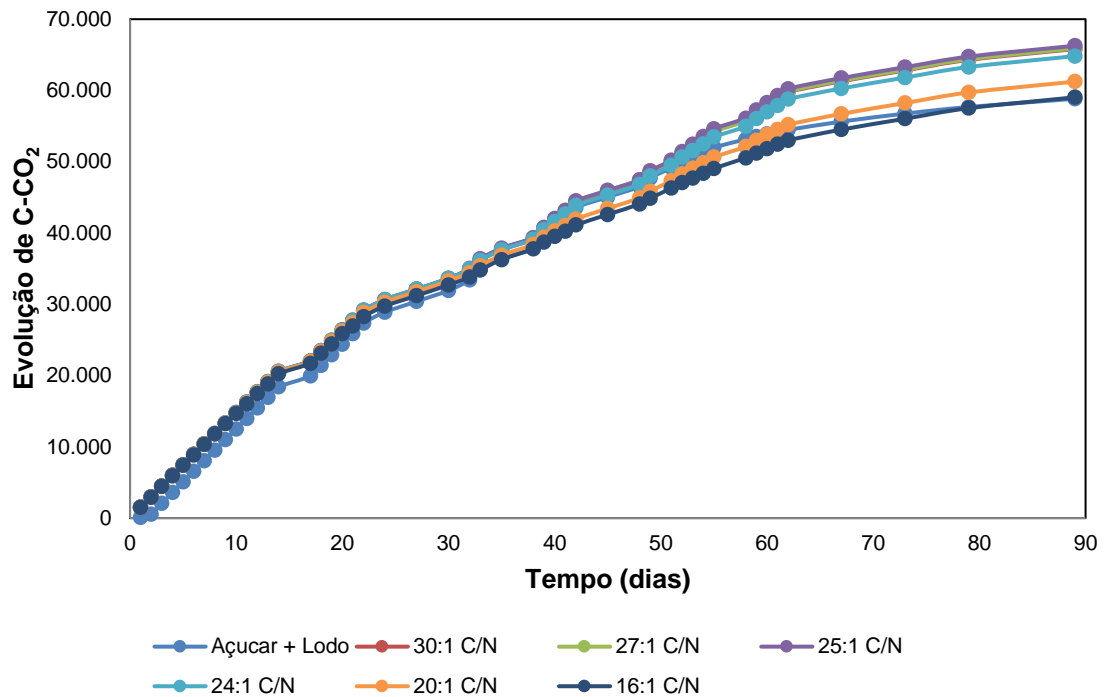


Figura 2. Evolução de C-CO₂ em função das diversas misturas de lodo de esgoto e poda de árvore em ensaio de respirometria

Tabela 13. Parâmetros da equação de cinética de primeira ordem estimados a partir do ajuste dos dados de C-evoluído e taxa de degradação obtidos ao longo de 90 dias de condução do teste de respirometria ⁽¹⁾

Amostra	C - adicionado	C-CO ₂ evoluído	C- degradado	C ₀	K-dia ⁻¹	R ²	T ^{1/2} dias	C- degradado (%)	Equação
mg/respirômetro									
Lodo/Açúcar	44.984	22.976,4	6.265,6	59.950,1	0,0198	0,9931	35,2	13,9	C-CO ₂ evoluído = 59950,1x (1 - e ^{-0,0198t})
C/N 30:1	27.209	25.013,3	6.821,1	62.436,4	0,0201	0,8593	34,5	25,0	C-CO ₂ evoluído = 62436,4 x (1 - e ^{-0,0201t})
C/N 27:1	26.810	25.054,2	6.832,2	62.460,9	0,0201	0,9968	34,4	25,4	C-CO ₂ evoluído = 62460,9 x (1 - e ^{-0,0201t})
C/N 25:1	26.426	25.178,8	6.866,2	63.173,7	0,0198	0,9965	34,9	25,9	C-CO ₂ evoluído = 63173,7 x (1 - e ^{-0,0198t})
C/N 24:1	26.347	24.657,8	6.724,1	60.401,8	0,0209	0,9971	33,1	25,5	C-CO ₂ evoluído = 60401,8 x (1 - e ^{-0,0209t})
C/N 20:1	25.274	23.342,7	6.365,5	54.219,6	0,0236	0,9977	29,3	25,1	C-CO ₂ evoluído = 54219,6 x (1 - e ^{-0,0236t})
C/N 16:1	24.250	22.567,3	6.154,1	51.421,5	0,0249	0,9981	27,7	25,3	C-CO ₂ evoluído = 51421,5 x (1 - e ^{-0,0249t})

(1) C-CO₂ evoluído = C₀ x (1 - e^{-kt}) C-CO₂ evoluído = quantidade de CO₂ (mg) liberado no tempo de realização do teste de degradação

C₀ = quantidade de CO₂ potencialmente liberado (mg), no tempo de realização do teste de degradação

k = constante de velocidade de degradação do carbono orgânico (dia⁻¹)

t = tempo em dias

Para garantir a confiabilidade dos dados, os 07 ensaios foram realizados em triplicata, e após o término dos 90 dias, a média de CO₂ acumulado em todas as amostras de todos os ensaios foi calculada para obtenção do erro padrão, conforme

demonstrado no gráfico da Figura 3, onde pode-se inferir que todos os tratamentos com amostra de lodo + poda (T2 a T7) apresentaram atividade biológica superior ao tratamento de lodo + açúcar (T1), o que significa que o lodo não oferece carbono disponível suficiente para ser compostado sozinho, o que torna a mistura com um material estruturante fundamental para o êxito do processo.

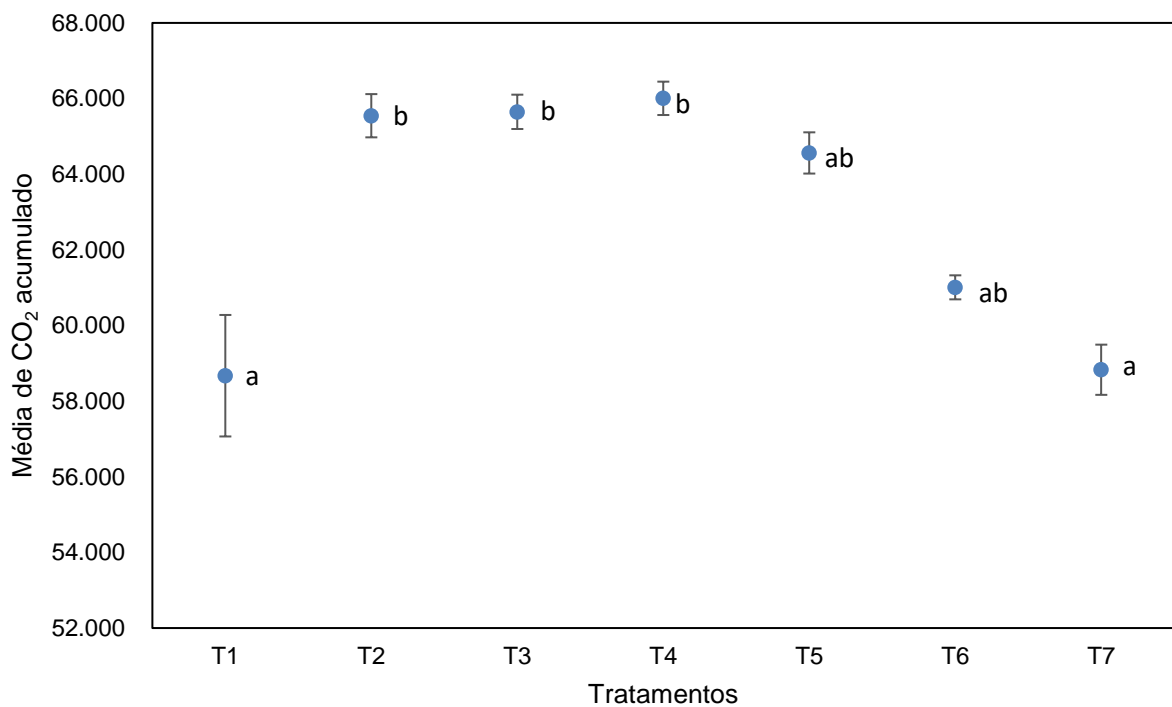


Figura 3. Médias e erro padrão da média de CO₂ acumulado em cada tratamento ⁽¹⁾

(1) A letras indicam médias diferentes pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Pela análise de variância para o CO₂ acumulado foi significativa a nível de significância de 0,1%, confirmando que há diferença entre os tratamentos. Os tratamentos 2, 3, 4 e 5 emitiram mais CO₂ (sem diferença estatística entre eles) e os tratamentos 1, 6 e 7 emitiram menos CO₂ (sem diferença estatística entre eles).

Através da análise das Figuras 2 e 3 e da Tabela 13 é possível observar que quanto maior a proporção de lodo na mistura, menor é a sua taxa de decomposição, ainda assim o tempo de meia vida de todas elas foi muito próximo, em torno de 30 dias, conseqüentemente, 60 dias para decomposição completa. Quanto a velocidade de decomposição, a da amostra 25:1 foi idêntica a da amostra de controle (lodo + açúcar),

mas sua liberação de CO₂ foi 10% superior, e a maior entre todas, indicando que essa mistura é adequada para o processo de compostagem.

O ensaio de respirometria indicou as relações C/N de 27 a 24:1 como aquelas que proporcionaram as maiores taxas e velocidades de decomposição dos materiais orgânicos. Porém, em função da limitação de volume de lodo na confecção da primeira pilha de compostagem e de poda de árvore na segunda pilha de compostagem, as pilhas foram montadas a partir de uma relação C/N de 27:1 para pilha 1 e de 17:1 para a pilha 2.

Comparando o ensaio de respirometria do lodo da ETE de Atibaia com outros lodos gerados em condições diversas, verifica-se que Moretti et al. (2018) observou em ensaio de respirometria tempo de 74 dias para a decomposição do lodo de esgoto da ETE Ponte do Caixão, Piracicaba, SP, e taxa de decomposição de 19,8% para o lodo misturado a poda de árvore, valor menor que o encontrado para o lodo da ETE Estoril. Valores para poda de árvore semelhantes aos tratamentos T7 e T8. Essa redução na taxa de decomposição pode estar relacionada ao sistema de tratamento do esgoto, assim a caracterização do lodo e do material estruturante.

Bertoncini (2022) observou taxas de decomposição de 26% semelhante ao lodo da ETE Estoril para o lodo da ETE Bela Vista, Piracicaba, SP e maior tempo de meia vida (48 dias) quando se utilizou lodo e poda de árvore coletados no período do inverno e taxa de decomposição de 17%, e meia vida em torno de 20 dias para o mesmo material coletado no verão. Assim, conclui-se que para cada sistema de tratamento adotado e geração de lodo e época de recolhimento do material estruturante pode ocorrer mudanças na melhor mistura a ser efetuada no campo.

Vale mencionar que o método utilizado, Norma CETESB L6.350 (CETESB, 1990) modificado, foca na determinação de apenas um dos indicadores de performance da compostagem, no caso, a liberação de CO₂ que sugere a atividade microbiana da amostra, no entanto, há outros indicadores importantes a serem monitorados para garantir uma boa performance no processo, como a temperatura e a aeração, além de métodos mais rápidos para essa detecção.

Baiense et al. (2021) testou a compostagem de amostras de alface com esterco de cavalo e madeira de pinheiro, em biorreatores com sensores para o monitoramento

de temperatura, O_2 e CO_2 , simulando aeração forçada, controlada por meio de um rotâmetro acoplado a um regulador de pressão. O experimento durou no total 75h e foi possível verificar não somente a emissão de gás CO_2 , mas a temperatura atingida e a duração da fase termofílica, indicador fundamental para garantir a boa desinfecção. Isso demonstrou que, o método além de mais ágil, se comparado ao método da CETESB (duração de 90 dias), é mais completo para a determinação de uma boa mistura para a compostagem.

Inácio et al. (2018), também testou a compostagem aeróbio-termofílica de 4 misturas de diferentes tipos de resíduos orgânicos agrícolas, em condições análogas, e obteve em 14 dias, resultados de temperatura, relação C/N e respirometria biológica típicas de um processo de compostagem, reforçando mais uma vez a eficácia e completude do método.

6.2 ENSAIO PILOTO DE COMPOSTAGEM

Foram montadas 2 pilhas de compostagem. A pilha 1, no dia 14 de junho de 2022, com massa de 6,6 toneladas de poda e 4,6 toneladas de lodo, dimensões de 1,2m de altura, 3,0m de comprimento, e relação C/N 27:1. A pilha 2, no dia 08 de julho de 2022, com 5,6 toneladas de poda e 10,5 toneladas de lodo, 1,5m de altura, 4,5m de comprimento e relação C/N 17:1 (Figura 4).



Figura 4. Montagem das Pilhas

Mensalmente foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas para o monitoramento do processo (Tabelas de 14 a 17).

Tabela 14. Caracterização das amostras componentes da mistura da pilha

Amostra	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Ovos viáveis helmintos Ovos/g ST	Salmonella	Coliformes NMP.(g de ST) ⁻¹	
					Totais	Voláteis	Fixos						Totais	<i>E. coli</i>
Lodo de esgoto	7,3	6,8	790,0	87,8	11,4	6,0	5,4	18,3	2,8	6,4	0,23	ausente	8,1 x 10 ⁶	2,9 x 10 ⁴
Poda de árvore				35,0				31,8	0,6	50,4				

Tabela 15. Monitoramento da Pilha 1 montada dia 14/06/2022 – 6,6 ton de lodo + 4,6 ton de poda- Relação C:N = 27

Data da coleta	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Salmonella	Coliformes NMP.(g de ST) ⁻¹	
					Totais	Voláteis	Fixos					Totais	<i>E. coli</i>
20/06	7,3	6,5	1.161,5	50,0	47,7	35,9	11,9	27,6	1,8	15,8	negativo	3,4 x 10 ⁵	2,3 x 10 ³
14/07	7,5	6,8	1.253,5	39,6	59,6	40,3	19,3	9,8	1,6	5,9	negativo	1,1 x 10 ⁵	7,6 x 10 ²
05/08 pen	7,4	6,9	1.308,5	39,2	57,4	27,9	29,4	21,2	1,1	19,3	negativo	-	-
05/08s/pen	7,3	6,9	1.200,00	42,4	48,3	31,2	17,1	20,2	1,5	13,1	negativo	3,8 x 10 ⁴	1,7 x 10 ³
13/09 s/pen	8,1	7,1	918,0	7,1	53,0	26,5	26,5	15,8	0,9	18,4	negativo	3,2 x 10 ³	3,2 x 10 ³
13/10 (120d)	8,0	7,1	792,5	48,9	49,3	23,9	25,4	14,5	1,2	12,1	negativo	2,6 x 10 ³	<3,0x10 ²

Tabela 16. Caracterização das amostras componentes da mistura da pilha 2

Amostra	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Ovos viáveis helmintos Ovos/g ST	Salmonella	Coliformes NMP.(g de ST) ⁻¹	
					Totais	Voláteis	Fixos						Totais	<i>E. coli</i>
Lodo de esgoto	7,7	7,1	932,5	81,2	17,6	9,9	7,7	17,4	3,2	5,5	0,58	ausente	5,2 x 10 ⁵	3,1 x 10 ⁵
Poda de árvore				35,1				31,2	0,7	44,6				

Tabela 17. Monitoramento da Pilha 2 montada dia 08/07/2022 – 10 ton de lodo + 5,6 ton de poda – relação C:N = 17:1

Data da coleta	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	CE (mS cm ⁻¹)	Teor de H ₂ O (65 °C)	Sólidos (%)			C	N	C/N	Salmonella	Coliformes NMP.(g de ST) ⁻¹	
					Totais	Voláteis	Fixos					Totais	<i>E. coli</i>
20/07	7,5	6,8	1.338,0	25,7	57,8	46,0	11,8	25,2	1,7	15,8	-	-	-
05/08pn	7,5	6,9	1.468,0	38,1	61,0	31,3	29,8	13,9	1,4	5,9	-	-	-
05/08sp	7,3	6,8	1.422,5	37,0	59,4	36,0	23,4	25,8	1,4	19,3	Negativo	3,8 x 10 ⁵	1,5 x 10 ⁴
13/09	7,7	7,1	1.318,0	38,2	54,8	26,9	27,8	23,1	1,0	23,1	Negativo	3,3 x 10 ²	3,3 x 10 ²
13/10 (90d)	7,7	7,1	939,0	57,3	41,7	22,1	19,6	20,5	1,6	12,9	Negativo	2,2 x 10 ³	< 4,3x10 ²
24/11 (120d)	7,6	7,1	889,5	28,2	48,0	26,3	21,6	31,6	1,6	19,7	Negativo	1,6 x 10 ⁴	1,6 x 10 ⁴

Após 120 dias, a pilha 1 apresentou uma redução superior a 99% na concentração de coliformes totais e 87% de *E. Coli* (Tabela 15), indicando que o processo de compostagem foi eficaz para reduzir a concentração dos patógenos do composto, conforme previsto na legislação vigente. Os demais parâmetros analisados, como umidade, pH e relação C/N, atenderam as especificações da SDA nº 61/2020, do Ministério da Agricultura e Pecuária MAPA, para considerar o material como fertilizante orgânico de Classe B (BRASIL, 2020). A pilha 2 (Tabela 17), após o período de 90 dias, apresentou todos os resultados dentro dos limites aceitáveis pela legislação, para a classe citada.

Moretti et al. (2018) testou a compostagem do lodo da ETE Ponte do Caixão em Piracicaba, em condições análogas e obteve um composto com relação C/N entre 12 e 15, os compostos das pilhas 1 e 2 apresentaram valores superiores, indicando uma melhor qualidade do composto obtido em Atibaia.

As temperaturas termofílicas são extremamente desejáveis durante o processo de compostagem, pois garantem que o produto final seja normalmente estável e livre de patógenos, beneficiando assim a fertilidade do solo. Portanto, a temperatura é uma das principais variáveis a serem monitoradas ao longo da reação de compostagem (BAIENSE et al., 2021). Assim sendo, diariamente foi realizado o monitoramento da temperatura das pilhas por meio de haste metálica e termômetro digital, em seis pontos das pilhas, a uma altura de 0,40 m, obtendo a temperatura média diária. Com os dados coletados foi possível verificar a quantidade de dias que as pilhas estiveram submetidas

a temperaturas acima de 55 °C, tida como base, para eliminação de organismos patogênicos presentes.

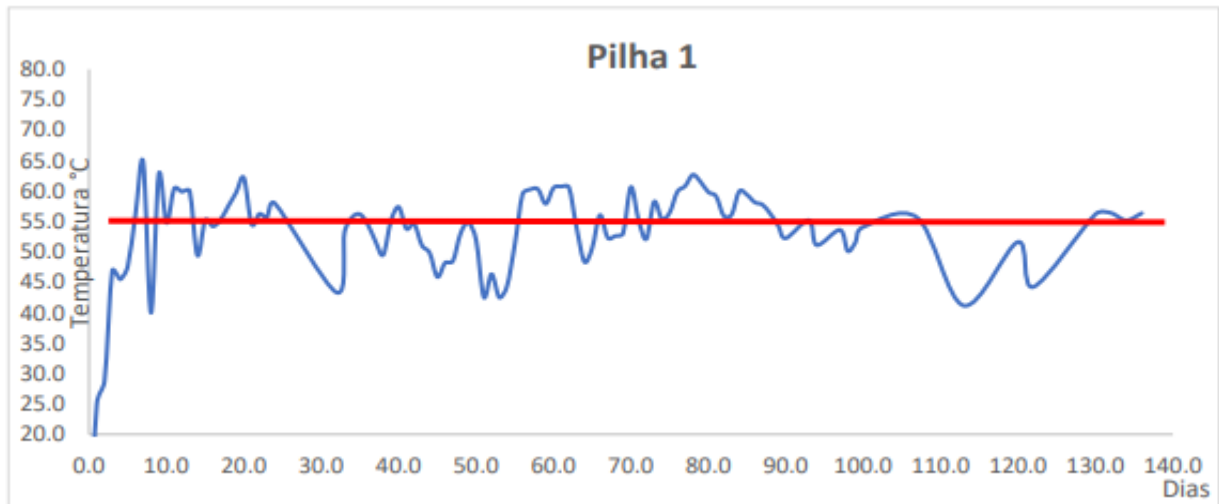


Figura 5. Monitoramento da Temperatura de Pilha 1

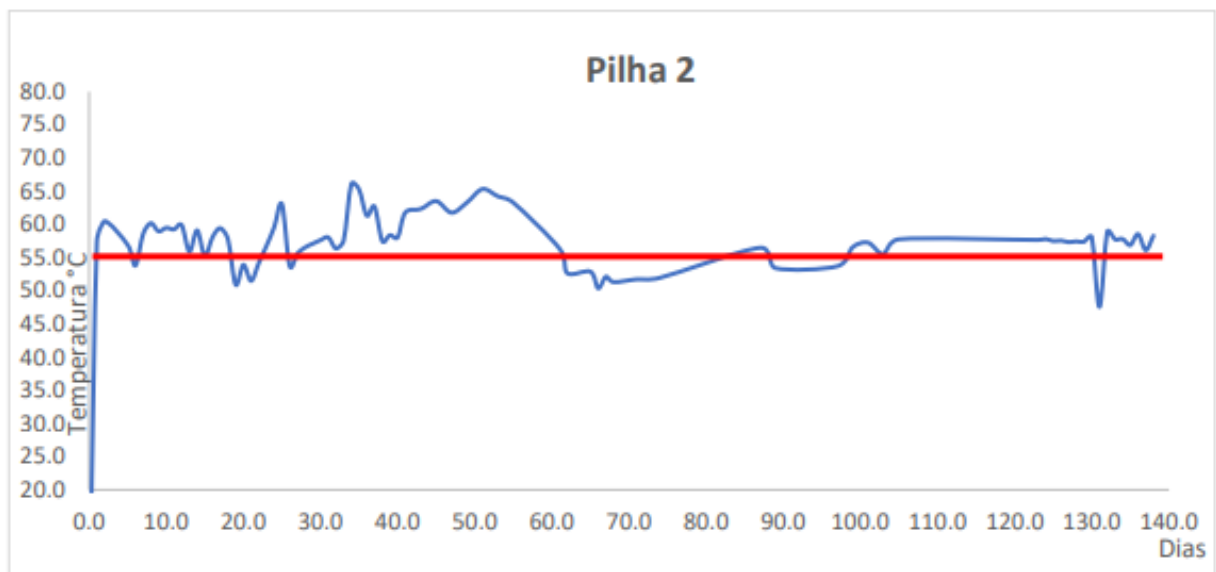


Figura 6. Monitoramento da Temperatura de Pilha 2

Ainda com relação a temperatura, foi constatado vários pontos de temperatura abaixo da ideal (55 °C), indicando que houve falhas no processo de revolvimento e irrigação, principalmente na pilha 1 (Figuras 5 e 6).

6.3 VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

O cenário I considerou a disposição dos resíduos em um aterro sanitário localizado na cidade de Guarulhos, São Paulo, a 50,3 km da ETE. Dessa forma, a distância a ser percorrida são 100,6 km para um percurso de ida e volta. Em 2021, esse aterro praticava a cobrança de R\$ 115,00 por tonelada de lodo recebida, e o custo com transporte, praticado por empresa terceirizada, era de R\$ 183,20 por tonelada.

Para obtenção da licença de transporte e destinação do biossólido, o certificado de movimentação de resíduos de interesse (CADRI), além do pagamento da taxa de R\$ 2.400,00, é necessário realizar análises laboratoriais, como teor de sólidos de cada carga, e caracterização do conteúdo a ser descartado conforme NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004). A renovação do CADRI ocorre a cada 5 anos. Ao todo, os custos anuais com análises laboratoriais totalizaram R\$ 7.000,00, sendo parte realizada em laboratório interno da ETE e outra parte subcontratada. Como esses custos já são usualmente praticados pela operação, não foi necessário realizar nenhum tipo de investimento, e como os serviços de transporte são terceirizados, também não foi considerado custos com depreciação. A mão-de-obra responsável já faz parte do quadro de colaboradores da ETE, logo não foi considerado custos extras com nova contratação. Os custos totalizaram R\$ 10.073.741,00 por um período de 20 anos (Tabela 18).

Tabela 18. Custo total com destinação em Aterro Sanitário, durante um período de 20 anos (Cenário I)

Itens avaliados	Valor (20 anos)
(-) Custo Operacional	
Transporte Aterro Sanitário	R\$ 6.062.614,00
Disposição Aterro Sanitário	R\$ 3.805.680,00
Análises Laboratoriais (insumos)	R\$ 49.639,00
Análises Laboratoriais (serviços terceirizados)	R\$ 143.402,00
CADRI	R\$ 12.405,00
Custo Total	R\$ 10.073.741,00

Valores de 2021 corrigidos anualmente pelo IPCA.
Fonte: SAMPAIO, 2022.

Já no cenário II, considerou a disposição dos biossólidos em um Centro de Compostagem privado, localizado em Jundiaí, a 64,7 km da ETE. Percurso de ida e volta de 129,4 km. Este Centro de Compostagem praticava o valor de R\$ 110,00 pela disposição do resíduo, já os custos de transporte neste cenário são um pouco mais elevados devido à distância, totalizando R\$ 200,00 por tonelada transportada.

Os demais custos foram mantidos, pois são equivalentes nos dois cenários (Tabela 19).

Tabela 19. Custo total com destinação em Centro de Compostagem, durante um período de 20 anos (Cenário II)

Itens avaliados	Valor (20 anos)
(-) Custo Operacional	
Transporte Centro de Compostagem	R\$ 6.618.574,00
Disposição Centro de Compostagem	R\$ 3.640.216,00
Análises Laboratoriais (insumos)	R\$ 49.639,00
Análises Laboratoriais (serviços terceirizados)	R\$ 143.402,00
CADRI	R\$ 12.405,00
Custo Total	R\$ 10.464.237,00

Valores de 2021 corrigidos anualmente pelo IPCA.

Fonte: SAMPAIO, 2022.

As análises dos diferentes cenários para determinação do custo operacional total da destinação e disposição final dos bio-sólidos produzidos no tratamento de esgotos em ETE com tecnologia lodos ativados, durante um período de vinte anos, mostraram-se elevados e promovem um grande impacto financeiro na atividade. Uma atividade é viável quando a redução de custos, supera os investimentos despendidos e o grande desafio das companhias é a capacidade de promover a redução dos custos operacionais em seu sistema produtivo (GASPAR, 2019). Considerando que os resíduos sólidos orgânicos podem ser matéria prima para produção de fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo (BRASIL, 2009), a adoção de tecnologias e técnicas com essa finalidade pode permitir uma redução nos custos totais de gerenciamento de bio-sólidos. Portanto, nos dois cenários foram introduzidos o investimento inicial necessário para produção de fertilizante, através do processo de compostagem, realizado na própria ETE, através de seus operadores, e contratação de alguns serviços terceirizados que viabilizem esse novo processo operacional.

O cenário III caracterizou-se com um investimento inicial (*Capex*) previsto para a implantação do processo de compostagem na ordem de R\$ 123.839,87 (Tabela 20), esse custo considera a contratação de uma consultoria especializada para elaboração e condução do projeto, tendo em vista que se trata de uma nova tecnologia, que não faz parte da rotina de uma operadora de saneamento, o custos com sondagem da parte do terreno da ETE que será destinada à nova atividade, a contratação de um laboratório certificado para realização das análises laboratoriais exigidas pela legislação vigente, os custos com licenciamento ambiental, visto que

toda e qualquer nova atividade na área da ETE deve passar pela aprovação do órgão ambiental responsável e constar na licença de operação do empreendimento, e por fim, os equipamentos e materiais necessários para execução da atividade.

Tabela 20. Capex do processo de compostagem

Investimentos	Valor total
Consultoria/Projeto	R\$ 50.124,70
Sondagens	R\$ 16.250,00
Análises lab. Externo	R\$ 45.000,00
Licenciamento ambiental	R\$ 4.830,00
Equipamentos	R\$ 2.893,82
Materiais	R\$ 4.741,35
TOTAL	R\$ 123.839,87

Valores de 2021.

Além do *Capex* inicial, o processo de compostagem também tem seus custos operacionais, por isso, foi considerado todo *Opex* do projeto, pelo período de 20 anos. Esses custos estão discriminados no Apêndice A, mas resumidos na Tabela 21 e preveem 10% do custo total de mão-de-obra, no caso do operador de retroescavadeira, que já atua na empresa, referente ao tempo dedicado para realização do revolvimento das pilhas de compostagem, uma vez que as demais atividades envolvidas no processo serão desempenhadas pelos próprios operadores da ETE.

O custo de locação da retroescavadeira também foi avaliado na parcela de 10%, considerando a necessidade de 4h semanais para dedicação ao projeto, como a locação é mensal, com utilização de 40h semanais, o custo foi dimensionado de forma proporcional.

Embora a irrigação das pilhas seja fundamental para o atingimento de bons resultados no processo de compostagem, os custos com água não foram considerados, pois pretende-se irrigar as pilhas reutilizando o efluente tratado na própria ETE.

Tabela 21. Opex da operação de compostagem durante 20 anos

Itens avaliados	Valor (20 anos)
(-) Custo Operacional	
Mão-de-obra	R\$ 116.655,00
Análises Laboratoriais (Conama 498 e MAPA)	R\$ 1.240.983,00
Locação de retroescavadeira (combustível incluso)	R\$ 579.125,00
Licenciamento Ambiental	R\$ 35.943,00
Materiais e ferramentas	R\$ 9.249,00
Custo Total	R\$ 1.981.954,90

Valores de 2021 corrigidos anualmente pelo IPCA.

Fonte: SAMPAIO, 2022.

Por fim, estabeleceu-se um fluxo de caixa com os custos envolvidos na implantação ou *capex* (Tabela 20) e exploração ou *opex* (Tabela 21) da unidade de compostagem (cenário III) durante vinte anos. Para cálculo da receita adotou-se o valor de mercado praticado para venda de adubo orgânico de classe B, avaliado em R\$ 215,00 por tonelada (valor de mercado obtido através de cotação), e produção média mensal de 21 toneladas do produto, visto que a produção média de lodo seco projetada na ETE é de 100 toneladas por mês e a relação lodo e adubo é igual a 0,21 (HAN et al. 2021). Então, foi realizada a análise econômico-financeira e determinado o VPL para cada cenário avaliado (Tabela 22).

Tabela 22. Dados financeiros e Valor Presente Líquido (12% a.a.), em reais, de três sistemas de destinação do lodo de esgoto produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto, em um período de 20 anos, para valores em reais (R\$)

CENÁRIO	ENTRADA	SAIDA	SALDO	VPL
I	R\$ 0,00	- R\$ 10.073.741,29	- R\$ 10.073.741,29	-R\$ 3.361.622,20
II	R\$ 0,00	- R\$ 10.464.237,17	- R\$ 10.464.237,17	-R\$ 3.491.891,77
III	R\$ 1.494.143,15	- R\$ 2.105.794,77	- R\$ 661.776,32	-R\$ 287.169,77

^I Destinação do lodo de esgoto para Aterro Sanitário

^{II} Destinação do lodo de esgoto para Centro de Compostagem Privado

^{III} Destinação do lodo de esgoto para compostagem própria

As análises econômico-financeiras (Tabela 22) mostraram-se inviáveis financeiramente, quando o fluxo de caixa das propostas foi submetido a uma taxa de desconto de 12% a. a., uma vez que o VPL foi negativo em todos os cenários. No entanto, é possível observar que no cenário III o VPL foi negativo em R\$ 287.169,77, enquanto nos cenários I e II esse valor ficou negativo em R\$ 3.361.622,20 e R\$ 3.491.891,77 respectivamente, o que indica que o tratamento de lodo apresenta realmente um custo de grande impacto para as companhias de saneamento, do ponto de vista econômico-financeiro, porém, a partir da aplicação da técnica de compostagem é possível minimizar esse impacto significativamente,

através da redução de custo operacional da empresa, uma vez que os custos de transporte e destinação superam os custos da compostagem e ainda oferece uma oportunidade de receita acessória para as companhias de saneamento a partir da venda do adubo. Considerando uma TMA de 12%, valor utilizado pelas Companhias de Saneamento (SMIDERLE, 2016) e a mínima exigida pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) para projetos de saneamento (FONTENELE; VASCONCELOS, 2006), observou-se, na Tabela 22 que a avaliação econômico-financeira não indicou rentabilidade e por consequência disso, não foi possível obter TIR, nem payback do investimento, logo, mais uma vez, a vantagem é representada pela economia que esse projeto traz, em detrimento às demais práticas comumente adotadas pelas empresas.

As concessionárias de saneamento são caracterizadas por fazerem investimentos volumosos em períodos curtos, para amortizar ao longo de grandes contratos de concessão. Segundo Almeida (2021), a importância do Contrato de Concessão se baseia na demanda de investimentos da área, uma das alternativas mais relevantes para o atingimento da universalização dos serviços de saneamento até 2033. De acordo com o Panorama do Saneamento Básico serão necessários mais de 800 bilhões em investimentos para o cumprimento dessas metas (ABCON, 2023) para isso, é imprescindível a obtenção de financiamentos, e os green bonds tem se mostrado uma alternativa vantajosa de agiar créditos e amortecer esses prejuízos (MAGALHÃES, 2020), porém exclusiva para companhias que comprovam ações sustentáveis, como é o caso da compostagem.

7. CONCLUSÕES

A compostagem se mostrou uma alternativa viável para garantir a desinfecção do lodo, e torná-lo próprio para a aplicação na agricultura, conforme a legislação vigente. As características físico-químicas e microbiológicas obtidas permitiram classificar o material, como fertilizante orgânico Classe B, segundo os critérios do MAPA (BRASIL, 2020). Embora tenha sido possível observar que as temperaturas em ambas as pilhas oscilaram abaixo da temperatura ideal para a fase termofílica, em algumas medições, o que indica falhas no processo de revolvimento e pode comprometer a desinfecção pretendida através da compostagem. É imprescindível

um controle rigoroso da temperatura e o revolvimento adequado, a fim de manter a temperatura acima de 55 °C, para garantir a eficácia da remoção de patógenos.

O composto obtido pode representar uma fonte de economia e receita para as companhias de saneamento, pois permite reduzir significativamente os custos com gestão do lodo (80% de redução em comparação a média dos dois cenários avaliados), principalmente com o transporte e a disposição, pois o aterro sanitário, ou o Centro Privado de Compostagem, deixam de ser a destinação final desse tipo de resíduo. Além de ser uma medida sustentável, já que no caso dos aterros sanitários, o recebimento de lodo é prejudicial e ainda reduz a vida útil do aterro..

O indicador econômico de rentabilidade VPL aplicado no tratamento e na destinação do lodo de esgoto mostrou-se inviável financeiramente em todos os cenários. O tratamento de lodo de esgoto não gera lucro para as companhias de saneamento no aspecto econômico-financeiro, no entanto, ao aplicar a compostagem, além da redução de 80% dos custos operacionais que o processo garante, é possível obter uma receita acessória a partir da venda do adubo produzido, e pode-se explorar outras fontes de receita como a produção de mudas para reflorestamento. Do ponto de vista ambiental, por se tratar de uma prática sustentável, é possível que a empresa obtenha selo verde, como o recebido pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), pelo Instituto Chico Mendes, como reconhecimento pela iniciativa de implantação do Centro Ecológico de Reciclagem de Pavimentos, na Vila Leopoldina, zona Oeste da capital paulista. O que além de marketing positivo, pode representar vantagens significativas na obtenção de crédito com juros mais baixos através dos títulos verdes.

No caso do município de Atibaia existe a possibilidade de se estabelecer políticas públicas que associem as atividades agrícolas, tão presentes na história do município, ao desenvolvimento do saneamento básico. A conexão entre o aumento da geração de lodo prevista pela universalização dos serviços de esgotamentos sanitário, e a demanda por adubo orgânico, principalmente para o cultivo de flores e manutenção dos canteiros, se gerida de maneira adequada pelo poder público, através de programas que reúnem os interesses da Concessionária aos dos agricultores pode configurar um modelo de política pública que fecha o ciclo do saneamento básico dentro do conceito *upcycling*, que além de eficiente, poderá ser replicado em qualquer município de características semelhantes.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Complementarmente, recomenda-se procedimentos de controle de qualidade que incluem; a realização dos testes de maturação (estabilidade biológica e fitotoxicidade), de germinação e de respirometria, a fim de garantir a aplicabilidade do composto em solo e avaliar a comercialização do composto obtido, a partir de uma pesquisa de mercado, cálculo de impostos que não foram considerados nesse estudo e custo e procedimentos para a obtenção de licença do produto junto aos órgãos competentes.

Desde que estejam atendidas essas obrigações, a venda do produto é possível, podendo representar uma fonte de receita acessória para as companhias de saneamento, e uma redução nos custos de fertilização do solo pelo setor agrícola, uma vez que o composto orgânico de classe B tem um custo que pode ser até 50% inferior ao de um fertilizante sintético.

Nesse caso, também se recomenda realizar nova análise de viabilidade econômico-financeira considerando os demais custos relacionados a venda do composto, e outro ponto importante, que é o volume de lodo gerado. Como a maioria dos custos envolvidos ao processo de compostagem são fixos, ou seja, independem do volume produzido, em estações de tratamento por lodos ativados de maior porte, a geração de lodo será maior e conseqüentemente, a produção de adubo a acompanhará, possibilitando uma receita maior, o que poderá conferir viabilidade econômico-financeira ao projeto.

9. REFERÊNCIAS

ABCON. Panorama da Participação Privada no Saneamento Brasil, edições 2020, 2022 e 2023. Abcon Sindcon, Disponível em:

<<http://abconsindcon.com.br/publicacoes/panorama-daparticipacao-privada-no-saneamento/>>. Acesso em: 10 de dez de 2023.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Classificação de Resíduos Sólidos. NBR 10004. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. NBR 9649. Rio de Janeiro, 1986.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Urbana e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Disponível em: <abrelpe.org.br/download-panorama-2017>. 2018. Acesso em: 04 de fev de 2019.

ABREU JUNIOR, C. H.; MARTIN NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; SIMÕES, M. L.; SILVA, W. T. L. Métodos analíticos utilizados em química do solo. In: ALLEONI, L.R.F, & MELO, V.F. (Ed.). Química e mineralogia do solo. Vol.2, Cap.XX. SBCS, Viçosa, p.529-685, 2009.

ABREU, Alan Henrique Marques de. Reciclagem agrícola e florestal de lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro. 2017. 83 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017.

ABREU, C.A.; FERREIRA, M.E. & BORKET, C.M. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: Zinco e cobre. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B.van & ABREU, C.A., eds. Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal, CNPq/FAPESP/POTAFOS, p. 125-150, 2001.

ABUŞOĞLU, Ayşegül et al. Life cycle assessment (LCA) of digested sewage sludge incineration for heat and power production. Journal of Cleaner Production, v. 142, p. 1684-1692, 2017.

ADACHI, V. O que são os green bonds? O ABC da dívida ESG. 2021. Disponível em: <<https://www.capitalreset.com/o-que-sao-os-green-bonds-o-abc-da-divida-esg/>>. Acesso em: 05 de nov de 2021.

AFÁZ, Daniela Cristina de Souza et al. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. *Revista Ambiente & Água*, v. 12, p. 112-123, 2017.

ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e produção de lodo. *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: SABESP, p. 7-40, 2001.

ALMEIDA, Gustavo Acioli Gondim de. *Os contratos de concessão no novo marco regulatório do saneamento público*. 2021.

ANDRADE, J. C.; ABREU, M. F. *Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais*. Campinas: IAC, 2006.

ANDRAUS, S. et al. *Agentes patogênicos: bactérias entéricas. Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções*. Curitiba: Sanepar Finep, p. 126-155, 1999.

ANDREOLI, C. V., TAMANIN, C. R., HOLSBACH, B., PEGORINI, E. S., NEVES, P. S. *Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal*. In: *biossólidos - alternativas de uso de resíduos do saneamento*. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2006.

ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. *Lodo de esgoto: Tratamento e disposição final*. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2001.

ANDREOLI, C.V. et al. *Alternativas de uso de resíduos do saneamento*. Rio de Janeiro: Abes, p. 417, 2006.

ANDREOLI, C.V. et al. *Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura*. Curitiba: Sanepar Finep, p. 98, 1999.

ARAUJO, Alyson Silva de. *Biochar de lodo de esgoto e Trichoderma afroharzianum no controle de fungos fitopatogênicos*. 2023.

ASSAF NETO, Alexandre. *Os métodos quantitativos de análise de investimentos*. *Caderno de estudos*, p. 01-16, 1992.

ASSEMAE. *Anais do 49º Congresso de Saneamento 2019*. Disponível em <https://sistema.trabalhosassemade.com.br/repositorio/2019/20/anais/Anais_49CNSA_Final_V1.pdf>. Acesso em: 21 de jan de 2021.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano. Cronologia dos serviços de esgotos, com especial menção ao Brasil. Revista do Departamento de Águas e Esgotos de São Paulo, São Paulo, ano 20, n.33, p.15-19, 1959. Acesso em: 23 de out de 22.

BAIENSE, Kariza Mayra Silva Minini et al. Photoacoustic-based sensor for real-time monitoring of methane and nitrous oxide in composting. Sensors and Actuators B: Chemical, v. 341, p. 129974, 2021.

BARROS, Rodrigo. A história do saneamento básico na Idade Antiga. Rodo inside, 3 de dezembro de 2014. Disponível em: <<http://www.rodoinside.com.br/historia-saneamento-basico-na-idade-antiga/>>. Acesso em: 23 de out de 22.

BARROSO, M. M. Influência das micro e macropropriedades dos lodos de estação de tratamento de água no desaguamento por leito de drenagem. 2007. 249f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13062007-073455/pt-br.php>>. Acesso em: 06 de nov de 2022.

BERTONCINI, E.I. Compostagem de lodo de esgoto da ETE Bela Vista e resíduos vegetais da cidade de Piracicaba, SP, para produção de composto orgânico para uso agrícola – Relatório final, 47p, 2022.

BESERRA, V.A. Análise econômica e da viabilidade financeira do uso de resíduo sólido proveniente da bovinocultura leiteira na produção de volumosos. Volta Redonda, 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, 2016.

BITTON, G. Wastewater microbiology. New York: Ed. Wiley, 2001.

BLANK, L.; TARQUIN, A. Engenharia econômica. 6. ed. São Paulo: Ed. McGrawHill, p. 756, 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 19 ago. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm Acesso em: 20 de ago de 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Legislativo, Brasília, DF, 03 ago. Seção 2, p. 2. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020 Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Brasil, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm. Acesso em: 20 de ago de 2020.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Brasília, DF: Presidência da República, 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 23 de out de 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 jul. Seção 1, p. 20. 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução – CONAMA. Resolução no 375/2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 de ago de 2006.

BRASIL. Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab): mais saúde com qualidade de vida e cidadania / Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: Ministério das Cidades, 2014.

BRASIL. Portaria Interministerial nº 571, de 5 de dezembro de 2013.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 19 de março de 2022.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2015. Brasília: SNIS, 2015.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2019. Brasília: SNIS, 2019.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2020. Brasília: SNIS, 2020.

BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2022. Brasília: SNIS, 2022.

BRITO, Débora. A água no Brasil: da abundância à escassez. Agência Brasil, v. 25, p. 2018-10, 2018.

BOFF, Salete Oro; BOFF, Vilmar Antônio. Extrafiscalidade tributária como política pública voltada à sustentabilidade socioambiental. RJLB. Ano, v. 7, p. 2149-2171, 2021.

BUCCI, Maria Paula Dallari (org.). Políticas públicas: reflexões sobre o conceito jurídico. São Paulo: Saraiva, 2006.

CASSINI, S. T. Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem (2013). Review 2013. São Paulo: CEMPRE. Recuperado de: <<http://cempre.org.br/busca/review%202013>>. Acesso em: 23 de out de 2022.

CERQUEIRA, P.L.W.; AISSE, M.M. Dimensionamento de leitos de secagem para desaguamento de lodo anaeróbio: uma análise crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2017. Anais [...]. São Paulo: ABES, 2017.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Norma Técnica nº L6.350, Determinação da biodegradação de resíduos – Método Respirométrico de Bartha. São Paulo, CETESB, 1990.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Norma Técnica nº P4.230, Aplicação de lodo de sistemas de tratamento biológico de efluentes líquidos sanitários em solo - diretrizes e critérios para projeto e operação. São Paulo, CETESB, 2021.

CHANG, Zhiyang et al. Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 154, p. 104606, 2020.

CHEN, Hung-Ming et al. Nontyphoid Salmonella infection: microbiology, clinical features, and antimicrobial therapy. *Pediatrics & Neonatology*, v. 54, n. 3, p. 147-152, 2013.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 653-662, 2008.

CÓ JÚNIOR, Caramo; MARQUES, Marcos O.; TASSO JÚNIOR, Luiz C. Efeito residual de quatro aplicações anuais de lodo de esgoto e vinhaça na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v. 28, p. 196-203, 2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Aplicação de biossólido em áreas agrícolas: Critérios para projeto e operação São Paulo, 1999. 35p. (Manual Técnico).

CONG, Xinyu et al. Effects of microwave, thermomechanical and chemical treatments of sewage sludge ash on its early-age behavior as supplementary cementitious material. *Journal of cleaner production*, v. 258, p. 120647, 2020.

CONTIN, Marco; GOI, Daniele; DE NOBILI, Maria. Land application of aerobic sewage sludge does not impair methane oxidation rates of soils. *Science of the total environment*, v. 441, p. 10-18, 2012.

CORNELLI, Renata et al. MÉTODOS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA. *Revista de Estudos Ambientais*, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 20-36, jul. 2015. ISSN 1983-1501. Disponível em: <<https://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/4423>>. Acesso em: 01 de fev de 2022.

CORRÊA, Rodrigo S.; FONSECA, Yone MF; CORRÊA, Anelisa S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 420-426, 2007.

COYLE, D.; BUXTON, M.; O'BRIEN, B.J. Measures of importance for economic analysis based on decision modeling. *Journal of Clinical Epidemiology*, v. 56, p. 989–997, 2003.

DE MATOS, Mateus Pimentel; DE MATOS, Antonio Teixeira. Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, v. 20, n. 4, p. 357-363, 2012.

DIAS, Victor Pina; FERNANDES, Eduardo. Fertilizantes: uma visão global sintética. 2006.

DOS REIS NUNES, Larissa; DIAZ, Raphael Rodrigo Licheski. A evolução do saneamento básico na história e o debate de sua privatização no Brasil. *Revista de Direito da Faculdade Guanambi*, v. 7, n. 2, p. 1, 2020.

EPSTEIN, Eliot. *The science of composting*. 1st ed. Lancaster: Technomic Publishing Company Inc. p. 225, 1997.

FARIA, Marianne Fidalgo de. *Compostagem de lodo de esgoto e indicadores de patogenicidade*. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência Florestal. (Tese, Doutorado). São Paulo, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Ciência Florestal, 2018.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. da. Manual prático para compostagem de biossólidos. UEL - Universidade Estadual de Londrina. Londrina PR. 1996.

FERNANDES, F. SILVA, SMCPD Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos. Londrina: UEL-Universidade Estadual de Londrina, 1999.

FERNÁNDEZ-NAVA, Yolanda et al. Life cycle assessment of different municipal solid waste management options: a case study of Asturias (Spain). *Journal of Cleaner Production*, v. 81, p. 178-189, 2014.

FONTENELE, RES; VASCONCELOS, ON de. Viabilidade financeira e econômica de projetos de saneamento: aplicação ao sistema de abastecimento da cidade de Milha, no Ceará. *ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP)*, v. 26, 2006.

FORBES. 39 empresas brasileiras estão entre as melhores do mundo em práticas ESG. 2021. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesesg/2021/07/39-empresas-brasileiras-estao-entreas-melhores-do-mundo-em-ranking-de-praticas-esg/>>. Acesso em: 15 de nov de 2021.

FOWLER, Jack; BAGBY, ROSE MARY; TRAINER, Ed. Dewatering sewage sludge with geotextile tubes. In: *Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference*. Canadian Geotechnical Society, St. John's, NL, Canada, p. 1-31, 1996.

GASPAR, Livia, gerenciamento de resíduos agroindustriais direcionado à produção de fertilizante orgânico: aplicação da gestão da qualidade e análise econômico-financeira. Rio de Janeiro, UFRJ, 2019.

GITMAN, Lawrence, J. *Princípios de Administração Financeira*. 3. ed. São Paulo: Harper e Row do Brasil, 1984.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Rio de Janeiro: Rima Artes e Textos, 2001. 287 p. (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB, 2). cap. 3, p. 57-86.

GONÇALVES, Ricardo F.; LUDUVICE, Maurício; VON SPERLING, Marcos. Remoção da umidade de lodos de esgotos. ANDREOLI, CV; Von SPERLING, M.; FERNANDES, F.(Ed.). Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6, p. 159-259, 2001.

GUANGYIN, Zhen; YOUCAI, Zhao. Sewage sludge generation and characteristics. In: Pollution control and resource recovery. 2017.

HALLEY, Edward; MILLER, Greg. Backward' approach to sludge management. Water Engineering & Management, v. 138, n. 9, p. 36-39, 1991.

HAN, Wei et al. Resource reclamation of municipal sewage sludge based on local conditions: a case study in Xi'an, China. Journal of Cleaner Production, v. 316, p. 128189, 2021.

HAUG, R.T. The practical handbook of compost engineering. Boca Raton: Lewia Publishers, p. 699, 1993.

HOUDKOVÁ, Lucie et al. Thermal processing of sewage sludge—II. Applied Thermal Engineering, v. 28, n. 16, p. 2083-2088, 2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 20 de dez.2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação, 2019. Página inicial. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 27 de mar. de 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação, c2022. Página inicial. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html>>. Acesso em: 27 de mar. de 2022.

IBI (Org.) - International Biochar Institute, 2018. Disponível em: <<https://www.biocharinternational.org/>>. Acesso em: 10 dez. 2023.

INÁCIO, C. de T.; MILLER, Paul Richard Momsen. Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. 2009.

INÁCIO, Caio T. et al. The relative isotopic abundance ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) during composting of agricultural wastes in relation to compost quality and feedstock. *Isotopes in environmental and health studies*, v. 54, n. 2, p. 185-195, 2018.

KEHERWALD, Gabriel Urias. Biochar de lodo de esgoto como fonte de fósforo para o milho: uma abordagem inicial. 2021.

KHIARI, Bisma et al. Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. *Desalination*, v. 167, p. 39-47, 2004.

KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto (Vol. 1). Piracicaba: Degaspari, 2004.

LATHAM, J.L. Elementary reaction kinetics. Edgard Blücher, São Paulo, 1974.

LAWSON, C. R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynthetics International*, v. 15, n. 6, p. 384-427, 2008.

LIEW, Abdul G. et al. Incorporation of sewage sludge in clay brick and its characterization. *Waste Management & Research*, v. 22, n. 4, p. 226-233, 2004.

LIU, Beibei et al. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. *Science of the Total Environment*, v. 447, p. 361-369, 2013.

LIU, Weixing et al. Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: a case study in Kunshan, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, p. 125046, 2021.

LIU, Weixing et al. Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: a case study in Kunshan, China. *Journal of Cleaner Production*, v. 287, p. 125046, 2021.

LUDUVICE, Maurício. Processos de estabilização de lodos. Lodos de Esgotos– Tratamento e Disposição Final. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

MACHADO M. F. S. A situação brasileira dos biossólidos. 82 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente). Universidade de Campinas. Campinas, 2001.

MAGALHÃES, A. L. Saiba por que os Títulos verdes ou “green bonds” são importantes formas de investimentos e como o interesse pelo meio ambiente está crescendo no mercado. 2020. Disponível em: <<https://conteudos.xpi.com.br/aprenda-a-investir/relatorios/green-bondsentenda-como-os-titulos-verdes-buscam-a-combinacao-entre-sustentabilidade-e-retornofinanceiro/>>. Acesso em: 15 jun. 2021.

MARQUES, Marcos Omir. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. 1990. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MAYER, Philipp et al. How to determine the environmental exposure of PAHs originating from biochar. Environmental science & technology, v. 50, n. 4, p. 1941-1948, 2016.

MAZIVIERO, G. T. Avaliação do potencial citotóxico, genotóxico e mutagênico de lodo de esgoto por meio dos sistemas-teste Allium cepa e Tradescantia pallida. 115p. Dissertação de Mestrado (Biologia Celular e Molecular), Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro-SP, 2011.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison P.; TCHOBANOGLIOUS, Georg. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse. New York: McGraw-Hill, 1991.

METCALF; EDDY, INC. Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse. New York: Ed. McGraw-Hill, p. 1334, 2002.

METCALF; EDDY,. Wastewater engineering: treatment and reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill, p. 1819, 2003.

MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: Biossólidos: Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento. Rio de Janeiro: ABES, 2006.

MIRANZI, Mário Alfredo Silveira et al. Compreendendo a história da saúde pública de 1870-1990. *Saúde Coletiva*, São Paulo, v. 7, n. 41, p. 157-162, 2010. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/842/84213511007.pdf>>. Acesso em: 23 out.2022.

MONTEIRO, José Roberto do Rego. Plano Nacional de Saneamento-PLANASA Análise de desempenho, 1993. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/planasa/planasa.pdf>>. Acesso em 20 de Dez de 2022.

MORETTI, S.M.L. BERTONCINI, E.I; PEREIRA, M.H. Relatório Técnico Processo 2017/00944-0: Aceleração da fase de decomposição de processo de com postagem de lodos de esgoto e agroindustriais visando o uso dos compostos orgânicos na agricultura. PESQUISA INOVATIVA EM PEQUENA EMPRESAS – PIPE/FAPESP - 1ª FASE, 2018.

NORONHA, José F. Projetos Agropecuários; administração financeira, orçamento e viabilidade econômica. 1987.

NUNES, Andréia R. Schneider. Políticas públicas. Enciclopédia jurídica da PUC-SP. Celso Fernandes Campilongo, Alvaro de Azevedo Gonzaga e André Luiz Freire (coords.). Tomo: Direitos Difusos e Coletivos. Nelson Nery Jr., Georges Abboud, André Luiz Freire (coord. de tomo). 1. ed. São Paulo: Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2017. Disponível em: <https://enciclopediajuridica.pucsp.br/verbete/376/edicao-1/politicas-publicas>

OCNEANU, L.; BUCSA, R.C. The importance of economic analysis in investment projects. *Economy Transdisciplinarity Cognition*, v. 17, n. 2, p. 84-92, 2014.

ONU. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://odsbrasil.gov.br/>>. Acesso em 06 jul. 2022.

PAREDES FILHO, Mário Viana. Compostagem de lodo de esgoto para uso agrícola. *Revista Agrogeoambiental*, 2011.

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. 2010.

PELEGRINO, E.C.F.; FLIZIKOWSKI, L.C.; SOUZA, J.B. de. Compostagem de lodo de estação de tratamento de esgoto. In: VI Semana de Estudos de Engenharia Ambiental. Unicentro, 2008.

PIRES, A.B. Análise de viabilidade econômica de um sistema de compostagem acelerada para resíduos sólidos urbanos. Passo Fundo, 2011. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Passo Fundo Faculdade de Engenharia e Arquitetura, 2011.

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO; FERNANDES, Fernando. Manual prático para a compostagem de biossólidos. ABES, 1999.

PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO; FERNANDES, Fernando. Manual prático para a compostagem de biossólidos. ABES, 1999.

QUINTANA, Núria Rosa Gagliardi; CARMO, Maristela Simões do; MELO, Wanderley José de. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. Nucleus, p. 183-191, 2011.

RAHEEM, Abdul et al. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. Chemical Engineering Journal, v. 337, p. 616-641, 2018.

RÊGO, I.D. Análise de investimento em uma empresa de pequeno porte fabricante de placas de veículos. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção). Natal, 2010. 88 f. Universidade Federal Escola de Engenharia de Natal, 2010.

REIS, H. B. C. Os impactos da globalização sobre o meio ambiente: uma introdução à análise da Comunicação Social. Contemporânea, n. 4, p. 169-180, 2005.

RIBEIRO, Livia Cristina. Compostagem de lodo de esgoto: caracterização e bioestabilização. 2018.

RIBEIRO, João Victor Schiavon; LEITE, Mariane Moro Barreto. Solução logística para importação de fertilizantes Estudo de caso para o Mato Grosso. Grupo de Pesquisa e

Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG). Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 23, 2017.

RODELLA, A. A.; SABOYA, L. V. Calibration for conductimetric determination of carbon dioxide. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 31, p. 2059-2060, 1999.

ROSS, S.; WESTERFIELD, R.; JORDAN, B. *Fundamentals of corporate finance standard*. McGraw Hill, p. 806, 2010.

SAMANEZ, C. P. *Matemática financeira: aplicações à análise de investimentos*. 3. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SAMPAIO, L. Infomoney. Relatório Focus: projeção para a inflação deste ano sobe pela 11ª semana seguida, 2022. Disponível em: <<https://www.infomoney.com.br/mercados/relatorio-focus-projecao-para-a-inflacao-deste-ano-sobe-pela-11a-semana-seguida>>. Acesso em 20 de Dez de 2023.

SANTOS, A. D. *Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo, 2003.

SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. *Análise química em plantas*. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Química, p. 56, 1974.

SEBASTIÃO, Jackson. *Análise das demonstrações financeiras como fator determinante na tomada de decisão: estudo de caso de entidades angolanas*. 2014. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Setúbal. Escola Superior de Ciências Empresariais.

SHIMADA, Tsutomu. Xenobiotic-metabolizing enzymes involved in activation and detoxification of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons. *Drug metabolism and pharmacokinetics*, v. 21, n. 4, p. 257-276, 2006.

SIEBIELSKA, Izabela. Comparison of changes in selected polycyclic aromatic hydrocarbons concentrations during the composting and anaerobic digestion processes of municipal waste and sewage sludge mixtures. *Water Science and Technology*, v. 70, n. 10, p. 1617-1624, 2014.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. Economia florestal. 2 ed. Viçosa, MG: UFV, p. 178, 2005.

SIMONETI, M. F. Inativação térmica de ovos de helmintos em água e biossólido digerido. 2006. 251p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SINGH, Rajeev Pratap et al. Management of urban solid waste: Vermicomposting a sustainable option. Resources, conservation and recycling, v. 55, n. 7, p. 719-729, 2011.

SMIDERLE, Juliana, Estudo de Viabilidade para Destinação Final do lodo da ETA Laranjal/RJ. Rio de Janeiro, UFRJ, 2016.

SOUZA, M. L. P.; RIBEIRO, A. N.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA, L. C. P.; BITTENCOURT, S. Aptidão das terras do Estado do Paraná para disposição final de lodo de esgoto. Revista DAE, v. 177, p. 20-29, 2008.

SPINOSA, Ludovico et al. Sustainable and innovative solutions for sewage sludge management. Water, v. 3, n. 2, p. 702-717, 2011.

SUN, Daquan et al. Effect of volatile organic compounds absorbed to fresh biochar on survival of *Bacillus mucilaginosus* and structure of soil microbial communities. Journal of Soils and Sediments, v. 15, p. 271-281, 2015.

TARANTINI, Adeline et al. Effect of the chemical composition of organic extracts from environmental and industrial atmospheric samples on the genotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons mixtures. Toxicological & Environmental Chemistry, v. 93, n. 5, p. 941-954, 2011.

TAY, Joo-Hwa; SHOW, Kuan-Yeow. Properties of cement made from sludge. Journal of environmental engineering, v. 117, n. 2, p. 236-246, 1991.

TEOH, Soon Kay; LI, Loretta Y. Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective. Journal of Cleaner Production, v. 247, p. 119495, 2020.

THAPA, Khagendra Bahadur et al. Lignite aided dewatering of digested sewage sludge. Water Research, v. 43, n. 3, p. 623-634, 2009.

TRIVELLA, Renato, O Uso do Composto de Resíduos Sólidos Orgânicos Urbanos na Agricultura: a Legislação e os Sistemas Orgânicos de Produção. Rio de Janeiro, UFRRJ, 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Under 40 CFR Part 503. Environmental Regulations and Technology - Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge (Including Domestic Septage). Appendix I -Test Method for Detecting, Enumerating, and Determining the Viability of Ascaris Ova in Sludge, p. 166, EPA/625/R-92/013, 2003.

UNITED STATES. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. OFFICE OF WASTEWATER MANAGEMENT. A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 rule. US Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management, 1995.

USEPA. Design manual: Dewatering municipal wastewater sludges. 1987.

VAN HAANDEL, A. C.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de esgoto. In: Biossólidos – Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento. Rio de Janeiro: ABES, p. 417, 2006.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. Revista brasileira de ciência do solo, v. 26, p. 747-758, 2002.

VERAS, L.L. Matemática financeira: uso de calculadoras financeiras, aplicações ao mercado financeiro, introdução à engenharia econômica, 300 exercícios resolvidos e propostos com respostas. 4. ed. São Paulo: Atlas, p. 260, 2001.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 452p., 2005.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 452 p. V. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final, v. 2, p. 15-66, 2001.

VON SPERLING, Marcos. Lodos ativados. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, New Brunswick, v. 37, p. 29-38, 1934.

WERNER, Deborah; HIRT, Carla. Neoliberalização dos Serviços Públicos: o papel do BNDES no Saneamento Básico pós-2000. Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 13, p. e20200078, 2021.

WERTHER, J.; OGADA, Ti. Sewage sludge combustion. Progress in energy and combustion science, v. 25, n. 1, p. 55-116, 1999.

XU, Changqing; CHEN, Wei; HONG, Jinglan. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China. Journal of Cleaner Production, v. 67, p. 79-87, 2014.

XU, Hang et al. Effects of pipe material on nitrogen transformation, microbial communities and functional genes in raw water transportation. Water research, v. 143, p. 188-197, 2018.

YU, Fei et al. Physical and chemical properties of bio-oils from microwave pyrolysis of corn stover. In: Applied Biochemistry and Biotechnology: The Twenty-Eighth Symposium Proceedings of the Twenty-Eight Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals Held April 30–May 3, 2006, in Nashville, Tennessee. Humana Press, p. 957-970, 2007.

ZABANIOTOU, A.; THEOFILOU, C. Green energy at cement kiln in Cyprus—Use of sewage sludge as a conventional fuel substitute. Renewable and sustainable energy reviews, v. 12, n. 2, p. 531-541, 2008.

ZHANG, Xiaohong et al. An emergy evaluation of the sewage sludge treatment system with earthworm composting technology in Chengdu, China. Ecological Engineering, v. 110, p. 8-17, 2018.

ZHOU, Cheng et al. A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting. *Waste management*, v. 40, p. 38-43, 2015.

APÊNDICE A

OPEX DETALHADO: DISCRIMINAÇÃO DOS CUSTOS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Itens avaliados	Quantidade	Unidade de medida	Custo Anual	Custo Total (20 anos)
(-) Custo Operacional				
Mão-de-obra				
Salários com Encargos e Benefícios	20	Horas Mensais	R\$ 4.230,00	R\$ 116.655,02
Serviços Terceirizados				
Análises Laboratoriais (Conama 498 e MAPA)	12	un	R\$ 45.000,00	R\$ 1.240.983,68
Locação de retroescavadeira (combustível incluso)	20	Horas Mensais	R\$ 21.000,00	R\$ 579.125,25
Impostos, Taxas e Emolumentos				
Licenciamento Ambiental	1	un	R\$ 4.830,00	R\$ 35.943,93
Materiais e ferramentas			R\$ 9.249,00	
Termômetro em Vara	5	un	R\$ 511,40	R\$ 1.634,50
Pá	3	un	R\$ 93,18	R\$ 297,82
Enxada	3	un	R\$ 93,18	R\$ 297,82
Ancinho	3	un	R\$ 66,66	R\$ 213,05
Carrinho de mão	2	un	R\$ 210,6	R\$ 673,10
Bombonas	20	un	R\$ 1.918,80	R\$ 6.132,73
			Custo Total	R\$ 2.032.079,60

APÊNDICE B

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

