



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA

**VALORIZAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO POR MEIO DA COMPOSTAGEM**

Bárbara Costa Lima

Salvador

2017





UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

ESCOLA POLITÉCNICA

## **VALORIZAÇÃO DE LODO ANAERÓBIO POR MEIO DA COMPOSTAGEM**

Bárbara Costa Lima

Dissertação apresentada ao Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz

Co-orientadora: Dr<sup>a</sup> Daniele Vital Vich

Salvador

2017

---

L732 Lima, Bárbara Costa  
Valorização de lodo anaeróbio por meio da compostagem. /  
Bárbara Costa Lima. - - Salvador, 2017.  
136f. : il

Orientador: Luciano Matos Queiroz.  
Coorientadora: Daniele Vital Vich.  
Dissertação (Mestrado – Mestrado em Meio Ambiente, Águas e  
Saneamento) – Universidade Federal da Bahia, Escola  
Politécnica, 2017.

1. Biossólidos. 2. Compostagem. 3. Lodo anaeróbio. 4. Resíduo  
de alimento. I. Queiroz, Luciano Matos. II. Vich, Daniele Vital. III.  
Título.

---

# MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Água e Saneamento



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITECNICA



Bárbara Costa Lima

## Valorização de lodo anaeróbico por meio da compostagem

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz  
Universidade Federal da Bahia

Profa. Dra. Daniele Vital Vich  
Universidade Federal da Bahia

Profa. Dra. Viviana Maria Zanta  
Universidade Federal da Bahia

Profa. Dra. Luciana Paulo Gomes  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Salvador  
05 de abril de 2017

Rua Aristides Novis, 02 - 4º andar, Federação - Salvador-BA - CEP. 40210-630  
Contato: (71) 3283-9785/3283-9454 E-mail: [maasa@ufba.br](mailto:maasa@ufba.br)  
Site: [www.maasa.eng.ufba.br](http://www.maasa.eng.ufba.br)



## **AGRADECIMENTOS**

Mãe, minha amada, obrigada pelo exemplo de força e resiliência que tanto me inspira.

Ao meu querido pai por me dar coragem e ânimo, sempre.

A Hélcio, meu grande companheiro, por todo suporte físico e emocional em todos os momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Matos Queiroz pela confiança, ensinamentos e orientação impecável desde os tempos da graduação.

À minha coorientadora Dr<sup>a</sup>. Daniele Vital Vich por sua dedicação e empenho em tornar esse trabalho melhor.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Viviana Zanta por toda presteza e gentileza em contribuir para a qualidade desse trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Paulo Gomes pelas contribuições e solicitude em atender demandas ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

A todos que participam/participaram do GRSE por todo auxílio, principalmente os bolsistas de iniciação científica: Camila, Laís, Luciana, Milena, Pedro e Tiago.

Aos colegas do MAASA e as meninas do “Almoças” por compartilharem o processo comigo, apoiando e dividindo experiências. Em especial, Laís que foi minha grande parceira nessa trajetória.

Aos funcionários do DEA, da Escola Politécnica, do LABDEA e do GEOAMB por todo apoio e colaboração.

Aos funcionários da EMBASA e CEASA pela parceria que possibilitou a realização da fase experimental.

Aos meus colegas e amigos de profissão que me auxiliaram em questões práticas e torceram por mim.

A todos meus amigos e familiares pelos momentos de descontração, pelo incentivo e suporte oferecido.

À FAPESB pela concessão da bolsa de mestrado.

Por fim, muitíssimo grata a todos que, de alguma forma, contribuíram para realização desse trabalho.



## AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome da Autora: Bárbara Costa Lima

Assinatura da Autora: Bárbara Costa Lima

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador, BA

Endereço: Rua Aristides Novis, nº 02 – 4º andar, Federação – Salvador - Ba

CEP: 40210-630

E-mail: costalima.barbara@gmail.com



## RESUMO

A valorização do lodo de esgoto por meio da compostagem é uma forma de prover uma destinação ambientalmente adequada para esse resíduo. Os objetivos deste estudo foram: avaliar aspectos de aplicabilidade, desempenho e manejo do processo de compostagem aplicado ao lodo oriundo de reator UASB e realizar o estudo econômico-financeiro da implantação desse processo em uma ETE de pequeno porte. A parte experimental teve duração de 140 dias e foi dividida em duas fases: a primeira fase com duas pilhas iguais (A e B) com aproximadamente 0,3m<sup>3</sup> utilizando o lodo anaeróbio e a serragem como agente estruturante (*bulking agent*) e a segunda fase, na qual se juntou as duas pilhas da primeira fase em uma única pilha (C) com, aproximadamente, 0,5 m<sup>3</sup> e adicionaram-se resíduos de alimentos como aditivo do processo (*amendment agent*). Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos avaliados foram: temperatura, pH, umidade, sólidos voláteis, NTK, COT, relação C/N, coliformes totais e *Escherichia coli*. A análise econômico-financeira foi realizada por meio do método de Valor Presente Líquido (VPL). Os resultados encontrados mostraram a necessidade do *bulking agent* para garantir estrutura e porosidade às pilhas e do *amendment agent* como fonte de substrato rapidamente degradável, para que o processo alcançasse e sustentasse a temperatura da fase termófila. As análises no composto final evidenciaram que as concentrações de ovos viáveis de helmintos, coliformes termotolerantes e substâncias inorgânicas estavam abaixo dos limites estabelecidos na Resolução CONAMA 375/2006. A análise econômico-financeira demonstrou que, realizando o monitoramento seguindo rigorosamente as exigências previstas nessa legislação, a implantação do processo de compostagem em uma ETE de pequeno porte é financeiramente inviável sendo necessário, minimamente, implantar a flexibilização de algumas das exigências da Resolução CONAMA 375/2006, sobretudo aquelas relacionadas à quantidade e frequência de amostragem. Pode-se concluir que a compostagem de lodo de esgoto gera um composto que possui potencial para uso agrícola, promovendo a reinserção de nutrientes nos ciclos biogeoquímicos e evitando a disposição em aterro sanitário e seus consequentes impactos ambientais.

**Palavras-chave:** biossólidos, compostagem, lodo anaeróbio, resíduo de alimento.



## ABSTRACT

The valorization of sewage sludge through composting is a way to provide an environmentally adequate destination for this waste. The aims of this study were: to evaluate aspects of applicability, performance and management of the composting process applied to the sludge from the UASB reactor and to realize the economic and financial study of the implementation of this process in a small WWTP. The experimental part lasted 140 days and was divided into two phases: the first phase with two equal piles (A and B) with approximately 0.3 m<sup>3</sup> using anaerobic sludge and sawdust as a bulking agent and the second phase, in which the two first phase piles were combined in a single pile (C) with approximately 0.5 m<sup>3</sup> and food waste were added as an amendment agent. The physicochemical and microbiological parameters evaluated were: temperature, pH, moisture content, volatiles solids, TKN, TOC, C/N ratio, total coliforms and *Escherichia coli*. The economic and financial analysis was performed using the Net Present Value method (NPV). The results showed the necessity of the bulking agent to guarantee structure and porosity to the piles and the amendment agent as a source of rapidly degradable substrate, in order to the process reached and sustained the temperature of the thermophilic phase. Analyses in the final compound showed that the viable egg of helminthes concentrations, thermotolerant coliforms and inorganic substances were below the limits established in brazilian standarts. The economic and financial analysis demonstrated that, by monitoring strictly compliance with the requirements of this legislation, the implementation of the composting process in a small WWTP is financially not viable and it is necessary to bring some flexibility of the requirements on the brazilian standarts, especially those related to the quantity and frequency of sampling. It can be concluded that the composting of sewage sludge generates a compost that has potential for agricultural use, promoting the reinsertion of nutrients in the biogeochemical cycles and avoiding the landfill disposal and its consequent environmental impacts.

**Keywords:** biosolids, composting, anaerobic sewage sludge, food waste.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do esgoto doméstico.....	31
Figura 2 – O processo de compostagem.....	41
Figura 3 – Interações alimentares dos organismos na compostagem.....	41
Figura 4 – Etapas da pesquisa.....	60
Figura 5 – Coleta do lodo anaeróbico no leito de secagem da ETE Iberostar.....	63
Figura 6 – Lodo de esgoto sendo homogeneizado para coleta e divisão das pilhas.....	64
Figura 7 – Mistura da serragem com o lodo.....	65
Figura 8 – Pilhas de compostagem de lodo.....	65
Figura 9 – Estação de Tratamento de Esgotos Especial. ....	68
Figura 10- Perfil de temperatura das pilhas de compostagem (A e B) da primeira fase.....	75
Figura 11 – Valor do pH das pilhas LA e LB ao longo da primeira fase.....	77
Figura 12 – Teor de umidade ao longo da primeira fase nas pilhas LA e LB.....	78
Figura 13 – Percentual de Sólidos Totais Voláteis nas pilhas LA e LB ao longo da primeira fase.....	79
Figura 14 – Evolução do Carbono Orgânico Total na primeira fase.....	80
Figura 15 - Evolução do teor de Nitrogênio Total Kjeldahl na primeira fase.....	81
Figura 16 – Evolução da relação C/N durante a primeira fase.....	82
Figura 17 – Evolução da concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> na pilha A.....	83
Figura 18 – Evolução da concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> na pilha B.....	84
Figura 19 – Perfil de temperatura da pilha de compostagem (C) da segunda fase.....	85
Figura 20 - Valor do pH da pilha LC ao longo da segunda fase.....	87
Figura 21 - Teor de umidade ao longo da segunda fase na pilha LC.....	89
Figura 22 – Percentual de Sólidos Voláteis na pilha C ao longo da segunda fase.....	90
Figura 23 - Evolução do Carbono Orgânico Total na segunda fase.....	91
Figura 24 - Evolução do teor de Nitrogênio Total Kjeldahl na segunda fase.....	92
Figura 25 - Evolução da relação C/N durante a segunda fase.....	93
Figura 26 – Evolução da concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> na pilha C.....	94
Figura 27 – Aglomerados formados na compostagem de lodo de esgoto e serragem.....	100





## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e caracterização de processos de compostagem. ....	42
---	----



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Origem dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos.....	32
Tabela 2 - Destinação final do lodo gerado no processo de tratamento de esgoto. ....	33
Tabela 3 – Composição química típica de lodo não tratado e biossólido digerido.....	33
Tabela 4 – Características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos.....	34
Tabela 5– Limite de metal pesado CONAMA 375/2006 e concentrações encontradas em lodo de esgoto no Brasil.....	35
Tabela 6 – Limite do CONAMA 375/2006 e concentração de agentes patogênicos em lodos de esgoto no Brasil.....	37
Tabela 7 – Substância orgânica tóxica, concentração permitida no solo (CONAMA 375/2006) e concentração média encontrada no lodo. ....	38
Tabela 8 – Aspectos legais relacionados ao lodo de esgoto.....	39
Tabela 9 – Experiências com a compostagem de lodo e alguns parâmetros importantes .....	44
Tabela 10 – Parâmetros e frequências de monitoramento da pesquisa .....	61
Tabela 11 - Classe de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos.....	62
Tabela 12 – Caracterização do lodo e da serragem .....	63
Tabela 13 – Concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> no lodo de esgoto .....	64
Tabela 14 – Caracterização do lodo e da serragem .....	66
Tabela 15 – Concentração de coliformes totais e <i>E. coli</i> na Fase 2.....	66
Tabela 16 – Dados utilizados para o cálculo da produção de lodo mensal.....	69
Tabela 17 – Cálculo da demanda de área do galpão para realização da compostagem.....	70
Tabela 18 – Resumo dos valores de investimento, receita e custos.....	71
Tabela 19 – Cenários de análise do VPL.....	72
Tabela 20 - Custo de análises laboratoriais para caracterização de um lote de lodo de esgoto de acordo com a Resolução CONAMA 375/06 no Brasil.....	72
Tabela 21 – Custos médios de análises laboratoriais por cenário. ....	73
Tabela 22 – Resumo dos dados utilizados na análise de VPL.....	73
Tabela 23 – Critérios de tempo-temperatura da Resolução CONAMA 375/2006 para o processo de compostagem de lodo. ....	86
Tabela 24 – Peso, volume e peso específico do material peneirado e retido do composto final. ....	96

Tabela 25 – Resultado da caracterização final do material peneirado e limites da Resolução CONAMA 375/2006.....	96
Tabela 26 - Resultado da caracterização final do material peneirado e limites da Resolução CONAMA 375/2006.....	98
Tabela 27 – VPL para os cenários propostos. ....	101
Tabela 28– Fluxo de caixa para os cenários analisados. ....	103
Tabela 29 – Preço mínimo para obter VPL positivo nos cenários analisados.....	104
Tabela 30 – Preço por m <sup>3</sup> do composto gerado para obter VPL positivo nos cenários analisados. ..	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CEASA	Central de Abastecimento de Salvador
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EMBASA	Empresa Baiana de Águas e Saneamento
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
L.A.	Leira Aerada
L.R.	Leira Revolvida
LABEXSAN 4	Laboratório Experimental de Saneamento 4
MS	Massa Seca
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento

PROSAB	Programa Nacional de Pesquisa em Saneamento Básico
R	Reator
RENTED	Rede Nacional de Tratamento Descentralizado de Esgotos
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>29</b>
	<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>29</b>
	<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>31</b>
	<b>3.1 Lodo de esgoto .....</b>	<b>31</b>
	3.1.1 <i>Características e produção.....</i>	31
	3.1.2 <i>Principais contaminantes.....</i>	35
	3.1.2.1 <i>Metais pesados .....</i>	35
	3.1.2.2 <i>Agentes patogênicos e indicadores biológicos.....</i>	36
	3.1.2.3 <i>Compostos orgânicos tóxicos .....</i>	37
	3.1.3 <i>Aspectos legais.....</i>	39
	<b>3.2 Compostagem de lodo de esgoto.....</b>	<b>40</b>
	3.2.1 <i>Estado da arte das práticas recentes de compostagem de lodo de esgoto.....</i>	43
	3.2.1.1 <i>Tamanho e tipo do sistema .....</i>	47
	3.2.1.2 <i>Tipo e umidade inicial do lodo.....</i>	49
	3.2.1.3 <i>Tipo de resíduo estruturante .....</i>	49
	3.2.1.4 <i>Umidade e relação C/N inicial da mistura .....</i>	52
	3.2.1.5 <i>Temperatura máxima atingida e tempo para alcançar temperatura &gt; 55°C.....</i>	55

3.2.1.6	<i>Duração do experimento</i>	57
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>59</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrição geral da pesquisa</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Primeira fase: Processo de compostagem utilizando lodo anaeróbio de esgoto e serragem como bulking agent</b>	<b>61</b>
4.2.1	<i>Monitoramento do Processo</i>	61
4.2.1.1	<i>Parâmetros físicos e químicos</i>	61
4.2.1.2	<i>Parâmetros microbiológicos</i>	62
4.2.2	<i>Matérias-primas utilizadas</i>	63
4.2.3	<i>Local do experimento e montagem das pilhas</i>	64
<b>4.3</b>	<b>Segunda fase: Adição do resíduo de alimentos como amendment agent</b>	<b>66</b>
4.3.1	<i>Composto final</i>	67
<b>4.4</b>	<b>Análise econômico-financeira</b>	<b>67</b>
4.4.1	<i>ETE utilizada para estudo de viabilidade econômica</i>	68
4.4.2	<i>Cálculo da produção de lodo descartado gerado</i>	69
4.4.3	<i>Investimento, receita e custos</i>	70
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>Monitoramento do processo</b>	<b>75</b>
5.1.1	<i>Primeira Fase: Lodo + Serragem</i>	75
5.1.1.1	<i>Parâmetros físico-químicos</i>	75
5.1.1.2	<i>Parâmetros microbiológicos</i>	83
5.1.2	<i>Segunda Fase: Lodo + Serragem + Resíduos de Alimentos</i>	85



5.1.2.1	<i>Parâmetros físico-químicos</i> .....	85
5.1.2.2	<i>Parâmetros microbiológicos</i> .....	93
5.1.2.3	<i>Qualidade do Composto final</i> .....	95
5.1.2.4	<i>Levantamento de aspectos operacionais do processo de compostagem em ETE de pequeno porte</i> .....	99
<b>5.2</b>	<b>Análise econômico-financeira</b> .....	<b>101</b>
5.2.1	<i>Valor Presente Líquido (VPL)</i> .....	101
5.2.2	<i>Fluxo de caixa</i> .....	103
5.2.3	<i>Comercialização do composto final</i> .....	104
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS</b> .....	<b>109</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>111</b>
<b>APÊNDICE A</b>	.....	<b>121</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Durante o tratamento das águas residuais, grandes quantidades de lodo são geradas, o que torna esse resíduo um subproduto inevitável do processo. Segundo dados do ano 2014 do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), o volume de esgoto tratado por ano é cerca de 3,8 bilhões de m<sup>3</sup>, com tendência a aumentar, visto que há, ainda, um grande déficit na coleta e tratamento de esgotos no Brasil. Como o lodo de esgoto é o resíduo gerado nas estações de tratamento de esgotos (ETE), sua geração também é crescente e deve ser administrada de forma a reduzir os impactos ao meio ambiente.

Segundo Chernicharo (2007), no Brasil, a utilização de reatores UASB é uma realidade no tratamento de esgotos domésticos e características como compactidade, baixo consumo energético e, também, a menor produção de lodo fazem com que essa tecnologia se expanda ainda mais pelo país. No estado da Bahia, em levantamento realizado por Marques (2017) em municípios de pequeno porte, observou-se a predominância de reator UASB como principal tecnologia de tratamento nos sistemas operados pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (EMBASA).

Ainda que ETE que utilizem reator UASB produzam lodo em menor quantidade (quando comparadas aos sistemas aeróbios), os problemas oriundos da má gestão do lodo produzido durante o tratamento biológico de esgotos sanitários são, muitas vezes, subestimados nos projetos de ETE visto que as possibilidades de tratamento e destinação desse resíduo são limitadas e estão sujeitas a várias restrições técnicas, econômicas, legais e ambientais.

Apesar das limitações, existem algumas soluções para a destinação do lodo de esgoto, mas que dependem, sobretudo, dos custos envolvidos na instalação, da origem, do valor agregado, da qualidade do produto final gerado e dos potenciais impactos ambientais decorrentes. No Brasil, quando devidamente disposto, o destino mais usual ainda é o aterro sanitário, solução que não permite a valorização e o aproveitamento dos nutrientes contidos no lodo de esgoto que podem ser reciclados e aproveitados como fertilizante agrícola, por exemplo.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal 12.305/2010 classifica, quanto à origem, os resíduos dos serviços públicos de

saneamento básico como aqueles gerados nessas atividades, portanto, o lodo de esgoto está incluso nessa classificação por ser um subproduto de ETE. Além disso, a redação da Lei, de certa maneira, incentiva o uso do lodo de esgoto, pois salienta que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve-se considerar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Como a compostagem é um processo biológico que proporciona a decomposição dos resíduos orgânicos biodegradáveis, torna-se uma solução atraente para gestão do lodo de esgoto, pois pode produzir um produto com potencial para utilização na agricultura. Entretanto, a utilização do produto final da compostagem como fertilizante orgânico carece de um rigoroso controle de qualidade a fim de atender aos requisitos preconizados na Resolução 375/2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

Portanto, há a necessidade de realizar estudos que investiguem o uso do processo de compostagem de lodo de esgotos a fim de buscar critérios para que essa atividade não apresente riscos à população. Por outro lado, esses critérios não podem ser excessivamente restritivos, de maneira que impossibilite o processo e traga como consequência a destinação inadequada desses resíduos gerando risco ainda maior à população. Adicionalmente, busca-se promover a reinserção dos nutrientes nos ciclos biogeoquímicos, ajudando a reduzir os impactos ambientais associados.

Sendo assim, tendo em vista as demandas crescentes, sobretudo em pequenos municípios, atendimento de empreendimentos condominiais ou mesmo pequenas comunidades, e que a adoção de reatores UASB no processo de tratamento de esgotos no Brasil é comum, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa:

É possível adotar o processo de compostagem para valorização do lodo produzido em reatores UASB?

Destaca-se que este trabalho é parte integrante da Rede Nacional de Tratamento Descentralizado de Esgotos (RENTED) e da Rede Nacional de Metodologias e Tecnologias para a Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos: ênfase na redução e valorização em ambientes urbanos (TECRESOL) criadas por meio da Chamada Pública 06/2010 do MCT/MACIDADES/FINEP/AT.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade do processo de compostagem para valorização do lodo oriundo de reator UASB.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Testar o uso da serragem como *bulking agent* (agente estruturante) e dos resíduos de alimentos como *amendment agent* (agente aditivo) do processo;
- Verificar o comportamento e a presença de agentes microbiológicos patogênicos na massa de resíduo e no produto final;
- Investigar aspectos do manejo, dificuldades, limitações da operação do processo de compostagem de lodo anaeróbio em pequena escala;
- Realizar estudo de viabilidade econômico-financeira do processo de compostagem do lodo para uma ETE de pequeno porte.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Esse tópico aborda os seguintes aspectos: características, produção, principais contaminantes e aspectos legais da legislação brasileira relacionados ao lodo de esgoto. Por fim, uma breve definição da compostagem e uma síntese de 25 (vinte e cinco) artigos publicados em periódicos científicos internacionais indexados em diferentes bases de dados que apresentam resultados sobre a compostagem de lodo de esgoto.

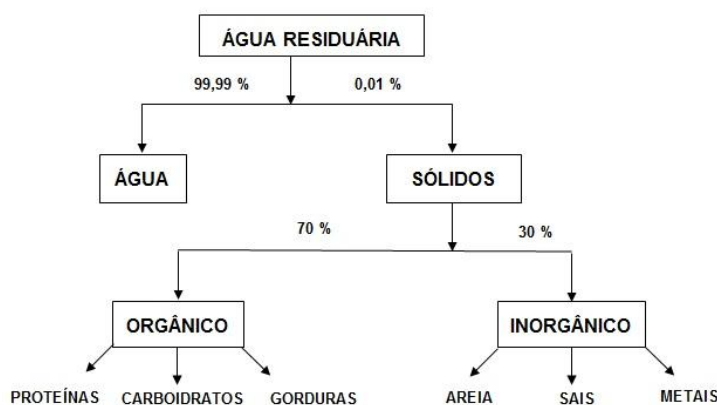
#### 3.1 Lodo de esgoto

Esse tópico apresentará características e produção nas ETE, principais contaminantes e os aspectos legais relacionados ao lodo de esgoto.

##### 3.1.1 Características e produção

O lodo de esgoto pode ser considerado o último resíduo do ciclo urbano da água (Fernandes *et al.*, 1999). Além disso, Bettioli e de Camargo (2006) afirmam que a composição do lodo de esgoto é altamente variável, dependendo de onde foi originado, se é majoritariamente residencial ou industrial, do tratamento ao qual foi submetido e também de seu caráter sazonal. A Figura 01 mostra a composição básica do esgotos domésticos.

Figura 1 - Composição do esgoto doméstico.



Fonte: Melo e Marques (2000) *apud* Bettioli e de Camargo (2006).

O lodo de esgoto também varia conforme o processo ou unidade da ETE no qual é gerado. A Tabela 01 mostra os diversos tipos de resíduos sólidos que são produzidos em diferentes fases do tratamento de esgoto.

Tabela 1 - Origem dos principais subprodutos sólidos gerados no tratamento de esgotos.

<b>Subproduto Sólido Gerado</b>	<b>Origem do Resíduo na ETE</b>
Sólidos grosseiros	Grade
Areia	Desarenador
Escuma	Desarenador, decantador primário e secundário, reator anaeróbio e lagoa de estabilização
Lodo primário	Tanque séptico e decantador primário
Lodo biológico aeróbio (não estabilizado)	Lodo ativado convencional e reatores aeróbios com biofilme (alta carga)
Lodo biológico aeróbio (estabilizado)	Lodo ativado (aeração prolongada) e reatores aeróbios com biofilme (baixa carga)
Lodo biológico anaeróbio (estabilizado)	Lagoas de estabilização e reatores anaeróbios
Lodo químico	Decantador primário com precipitação química e lodos ativados com precipitação de fósforo

Fonte: Von Sperling e Gonçalves (2001a).

Kosobucki *et al.* (2000) destacam que a geração do lodo de esgoto ocorre por meio de processos mecânicos, biológicos ou químicos durante o tratamento das águas residuais e que, mesmo representando cerca de 2% do volume de efluente nas estações de tratamento, observa-se o interesse de desenvolver novas ETE (ou aprimorar as existentes) que, portanto, terão que lidar com a administração do problema da destinação do lodo de esgoto. Além disso, Andreoli *et al.* (2001), salientam que o processamento do lodo de esgotos alcança de 20 a 60% dos custos de uma ETE e que, na maioria dos projetos, a destinação final do lodo ainda é negligenciada o que leva a operações emergenciais, acarretando prejuízos financeiros e poluição ambiental podendo, inclusive, afetar todo o sistema de coleta e tratamento de esgotos.

Von Sperling e Andreoli (2001) relatam que não existem dados consistentes sobre a produção e disposição final de lodo de esgotos e propõe que fossem estimados por meio da população beneficiada com serviços de coleta e tratamento de esgotos.

Sendo assim, quanto à produção, segundo os dados obtidos por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) no ano de 2014, o volume de esgoto tratado gerado por ano é 3,764 bilhões de m<sup>3</sup>. Considerando que 2% desse



valor seja o lodo, tem-se que o volume gerado é, aproximadamente, igual a 75.280.000,00 m<sup>3</sup>/ano ou 206.246.575,34 L/d.

Quanto à disposição final, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2008), realizou o levantamento do destino do lodo gerado no processo de tratamento de esgoto em alguns municípios brasileiros, sendo que alguns desses municípios podem fornecer mais de uma destinação final para o lodo. Os dados estão apresentados na Tabela 02.

Tabela 2 - Destinação final do lodo gerado no processo de tratamento de esgoto.

<b>Destinação</b>	<b>Quantidade de municípios</b>
Oceano	1
Incineração	19
Terreno baldio	97
Rio	163
Reaproveitamento	169
Outro	316
Aterro sanitário	452

Fonte: IBGE (2008).

Existe uma grande variação da composição dos diversos tipos de lodo de acordo com as características do esgoto, o processo de tratamento utilizado, sazonalidade e qualidade das redes coletoras de esgotos (Vanzetto, 2012).

A Tabela 03 apresenta algumas características químicas do lodo que, para Metcalf e Eddy Inc. (2003) são importantes para a destinação final tanto do sólido processado quanto da fase líquida removida durante o processo.

Tabela 3 – Composição química típica de lodo não tratado e biossólido digerido.

<b>Item</b>	<b>Lodo primário não tratado</b>		<b>Lodo primário digerido</b>		<b>Lodo ativado não tratado</b>
	<b>Intervalo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Valor típico</b>	<b>Intervalo</b>
Sólido Totais (ST) %	5 - 9	6	2 - 5	4	0,8 - 1,2
Sólidos Voláteis (% do ST)	60 - 80	65	30 - 60	40	59 - 88
Nitrogênio(N, % do ST)	1,5 - 4	2,5	1,6 - 3,0	3,0	2,4 - 5,0
Fósforo(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , % do ST)	0,8 - 2,8	1,6	1,5 - 4,0	2,5	2,8 - 11,0
Potássio(K <sub>2</sub> O, % do ST)	0 - 1,0	0,4	0 - 3,0	1,0	0,5 - 0,7
pH	5,0 - 8,0	6,0	6,5 - 7,5	7,0	6,5 - 8,0
Alcalinidade (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )	500 - 1.500	600	2.500 - 3.500	3.000	580 - 1.100

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2003).

Outra questão que distingue os lodos de esgotos é a quantidade gerada nos processos de tratamento, como mostra a Tabela 04, na qual essa produção é apresentada tanto em termos de massa quanto de volume.

Tabela 4 – Características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos.

Sistema	Característica do lodo produzido e descartado da fase líquida (dirigido à etapa de tratamento do lodo)			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d)	Volume de lodo (L/hab.d)
Tratamento primário (convencional)	0,35 – 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 – 2,2
Tratamento primário (tanque séptico)	0,20 – 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 – 1,0
Lagoa facultativa	0,12 – 0,32	5 - 15	12 - 32	0,1 – 0,25
Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa	0,20 – 0,45	15 – 20	20 – 45	0,1 – 0,3
• Lagoa anaeróbia	0,06 – 0,10	7 – 12	6 – 10	0,05 – 0,15
• Lagoa facultativa	0,26 – 0,55	-	26 - 55	0,15 – 0,45
• Total				
Lagoa aerada facultativa	0,08 – 0,13	6 - 10	8 – 13	0,08 – 0,22
Lagoa aerada mistura completa – lagoa sedimentação	0,11 – 0,13	5 – 8	11- 13	0,15 – 0,25
Tanque séptico + filtro anaeróbio				
• Tanque séptico	0,20 – 0,30	3 - 6	20 – 30	0,3 – 1,0
• Filtro anaeróbio	0,07 – 0,09	0,5 – 4,0	7 – 9	0,2 – 1,8
• Total	0,27 – 0,39	1,4 – 5,4	27 – 39	0,5 – 2,8
Lodo ativado convencional				
• Lodo primário	0,35 – 0,45	2 – 6	35 – 45	0,6 – 2,2
• Lodo secundário	0,25 – 0,35	0,6 – 1	25 – 35	2,5 – 6,0
• Total	0,60 – 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 – 8,2
Lodos ativados – aeração prolongada	0,50 – 0,55	0,8 – 1,2	40 - 45	3,3 – 5,6
Filtro biológico de alta carga				
• Lodo primário	0,35 – 0,45	2 – 6	35 – 45	0,6 – 2,2
• Lodo secundário	0,20 – 0,30	1 – 2,5	25 – 35	0,8 – 3,0
• Total	0,55 – 0,75	1,5 – 4,0	60 - 80	1,4 – 5,2
Biofiltro aerado submerso				
• Lodo primário	0,35 – 0,45	2 – 6	35 – 45	0,6 – 2,2
• Lodo secundário	0,25 – 0,35	0,6 – 1	25 – 35	2,5 – 6,0
• Total	0,60 – 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 – 8,2
Reator UASB	0,12 – 0,18	3 – 6	12 - 18	0,2 – 0,6
UASB + pós-tratamento aeróbio				
• Lodo anaeróbio (UASB)	0,12 – 0,18	3 - 4	12 – 18	0,3 – 0,6
• Lodo aeróbio (lodos ativados)	0,08 – 0,14	3 – 4	8 – 14	0,2 – 0,5
• Total	0,20 - 0,32	3 - 4	20 - 32	0,5 – 1,1

Fonte: Qasim (1985), USEPA (1979, 1987), Metcalf e Eddy Inc. (1991), Jordão e Pessôa (1995), Franci (1996, 1999), Aisse *et al.* (1999), Chernicharo (1997) *apud* von Sperling e Gonçalves (2001b).

### 3.1.2 Principais contaminantes

A Resolução CONAMA 375/2006 exige a caracterização do lodo ou produto derivado quanto a alguns contaminantes, pois o lodo de esgoto apresenta diversos poluentes que podem ser agrupados, de forma geral em: metais tóxicos, agentes patogênicos e compostos orgânicos tóxicos.

#### 3.1.2.1 Metais pesados

Silva *et al.*(2001) salientam que as concentrações de metais pesados no esgoto estão diretamente ligados ao tipo de contribuição, sendo assim, uma ETE que recebe esgotos exclusivamente residencial, provavelmente, terá baixos teores de metais pesados, e, conseqüentemente, baixo impacto ambiental e à saúde pública

Metcalf e Eddy Inc. (2003) salientam que, os metais, mesmo em pequenas quantidades, podem ser essenciais ou prejudiciais às plantas e animais. Elementos como zinco, magnésio, cobalto e ferro são fundamentais aos organismos vivos em quantidades limitadas enquanto chumbo, mercúrio e cádmio são metais que não desempenham qualquer função nos organismos sendo prejudiciais em qualquer concentração (Silva *et al.*, 2001). A Tabela 05 apresenta faixas de concentração de alguns metais pesados presentes em lodos de esgoto no Brasil.

Tabela 5– Limite de metal pesado CONAMA 375/2006 e concentrações encontradas em lodo de esgoto no Brasil.

Metal Pesado	Limite CONAMA 375/2006	Concentração no lodo de esgoto	Referência
Arsênio	41	1,1 – 10,3 N.D – 39 < 1,0	Bittencourt (2014) Tsutiya <i>et al.</i> (2001) Rangelet <i>et al.</i> (2006)
Bário	1300	12 – 357,6 123 - 617	Bittencourt (2014) Miyazawa <i>et al.</i> (1998)
Cádmio	39	0,025 – 4,13 N.D – 18 2,0 – 12,8 0,16 <1,0 2,2	Bittencourt (2014) Tsutiya <i>et al.</i> (2001) Rangel <i>et al.</i> (2006) Moreira (2013) Miyazawa <i>et al.</i> (1998) Santos (2009)
Chumbo	300	1,33 – 137,3 31 – 269 118,8 – 364,4 0,32 58 - 134	Bittencourt (2014) Tsutiya <i>et al.</i> (2001) Rangelet <i>et al.</i> (2006) Moreira (2013) Miyazawa <i>et al.</i> (1998)

(continua)

Tabela 5 – (Conclusão).

<b>Metal Pesado</b>	<b>Limite CONAMA 375/2006</b>	<b>Concentração no lodo de esgoto</b>	<b>Referência</b>
Cobre	1500	1,6 – 202,5	Bittencourt (2014)
		75 – 895	Tsutiya <i>et al.</i> (2001)
		239,8 - 1058	Rangel <i>et al.</i> (2006)
		8,33	Moreira (2013)
		100 -413	Miyazawa <i>et al.</i> (1998)
Cromo	1000	909,8	Santos (2009)
		0,97 – 370	Bittencourt (2014)
		633,8 - 1325	Rangel <i>et al.</i> (2006)
		0,32	Moreira (2013)
		99 – 167	Miyazawa <i>et al.</i> (1998)
Mercúrio	17	22	Santos (2009)
		0,002 – 2,76	Bittencourt (2014)
Molibdênio	50	N.D - 24	Tsutiya <i>et al.</i> (2001)
		0,02 – 12,2	Bittencourt (2014)
		N.D - <50	Tsutiya <i>et al.</i> (2001)
Níquel	420	< 0,01	Rangel <i>et al.</i> (2006)
		2,9 – 98,0	Bittencourt (2014)
		12- 360	Tsutiya <i>et al.</i> (2001)
		54,7 – 605,8	Rangel <i>et al.</i> (2006)
		118	Moreira (2013)
Selênio	100	26 – 71	Miyazawa <i>et al.</i> (1998)
		10	Santos (2009)
		6,13 – 22,8	Bittencourt (2014)
		N.D - 1	Tsutiya <i>et al.</i> (2001)
		Zinco	2800
456 – 2645	Tsutiya <i>et al.</i> (2001)		
1198 - 3372	Rangel <i>et al.</i> (2006)		
184,97	Moreira (2013)		
610 – 1700	Miyazawa <i>et al.</i> (1998)		
		600	Santos (2009)

Fonte: Própria autora (2017).

### 3.1.2.2

#### *Agentes patogênicos e indicadores biológicos*

A origem dos agentes patogênicos encontrados no lodo pode ser humana ou por meio dos excrementos de animais dispostos deliberadamente ou não nos sistemas de coleta de esgotos. Assim, as condições sanitárias e socioeconômicas da população, região geográfica, presença de indústrias e tipo de tratamento são variáveis que influenciam na quantidade de patógenos presentes no esgoto (Silva *et al.*, 2001).

Fernandes *et al.* (1999) salientam ainda a importância de conhecer os agentes patogênicos e sua viabilidade a fim de avaliar os riscos potenciais aos quais o homem e outros animais estão expostos. Ainda, segundo a Resolução CONAMA

375/2006, o lodo ou o produto derivado pode ser classificado como Classe A ou Classe B e um dos critérios para classificação é a quantidade e a concentração permitida de indicadores microbiológicos que são distintos para classe A (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *salmonella* e vírus entéricos) e Classe B (coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos). A Tabela 06 mostra os limites preconizados na resolução e a concentração de alguns agentes patogênicos em diferentes tipos de lodo no Brasil.

Tabela 6 – Limite do CONAMA 375/2006 e concentração de agentes patogênicos em lodos de esgoto no Brasil.

Agente patogênico	Limite CONAMA 375/2006	Concentração no lodo de esgoto	Referência
Coliformes	< 10 <sup>3</sup> (Classe A)	<3,0 – 1x 10 <sup>6</sup>	Tsutiya (2001)
Termotolerantes (NMP / g de ST)	< 10 <sup>6</sup> (Classe B)	2,87x10 <sup>7</sup> 1,6x10 <sup>4</sup> – 2,6x10 <sup>6</sup>	Alves Filho (2014) Faria (2015)
Ovos viáveis de helmintos (ovo / g de ST)	< 0,25(Classe A) < 10ovos / g (Classe B)	N.D –4,3 Ausência	Tsutiya (2001) Alves Filho (2014)
<i>Salmonella</i>	Ausência em 10g de ST (Classe A)	Ausência – 36,5 Ausência 0,31 – 9,37(NMP / g de ST)	Tsutiya (2001) Alves Filho (2014) Faria (2015)
Vírus	< 0,25 UFP ou UFF / g de ST (Classe A)	<0,1 – 12,50 (UFP / de ST) 0,22 – 10,89 (UFP / de ST)	Salvador (2011) Faria (2015)

Fonte: Brasil (2006).

### 3.1.2.3

#### *Compostos orgânicos tóxicos*

O aumento do uso de compostos orgânicos sintéticos levou à ocorrência e concentração dessas substâncias em efluentes e, conseqüentemente, nos lodos de esgoto (Rogers, 1996). Silva *et al.* (2001) salientam que a contaminação por esses compostos não ocorre somente em cidades altamente industrializadas mas também em zonas urbanas de diferentes portes advinda de pequenos contaminantes como, por exemplo, postos de gasolina. Sendo assim, deve-se atentar para contaminação por esses poluentes que podem inviabilizar o uso do lodo na agricultura.

A Tabela 07 mostra os dados obtidos na literatura para a concentração de cada um desses compostos orgânicos tóxicos listados na Resolução CONAMA 375/2006.

Tabela 7 – Substância orgânica tóxica, concentração permitida no solo (CONAMA 375/2006) e concentração média encontrada no lodo.

Substância	Concentração permitida no solo (mg/kg)	Média de concentração encontrada no lodo	Referência
<b>Benzeno clorados</b>			
1,2-Diclorobenzeno	0,73	0,026 0,098 6,9 0,12 0,03	Jones <i>et al.</i> (2014) Cai <i>et al.</i> (2007) Rogers <i>et al.</i> (1989) Bright e Healey (2003) Bittencourt (2014)
1,3-Diclorobenzeno	0,39	4,9	Rogers <i>et al.</i> (1989)
1,4-Diclorobenzeno	0,39	0,076 11,9	Cai <i>et al.</i> (2007) Rogers <i>et al.</i> (1989)
1,2,3-Triclorobenzeno	0,01	0,31 0,004	Rogers <i>et al.</i> (1989) Bittencourt (2014)
1,2,4-Triclorobenzeno	0,011	0,35 0,92 0,004	Cai <i>et al.</i> (2007) Rogers <i>et al.</i> (1989) Bittencourt (2014)
1,3,5-Triclorobenzeno	0,5	0,31 0,45	Rogers <i>et al.</i> (1989) Bittencourt (2014)
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	0,16	<0,001–0.22	Harrison <i>et al.</i> (2006)
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	0,01	<0,001–0.22	Harrison <i>et al.</i> (2006)
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	0,0065	<0,001–0.22	Harrison <i>et al.</i> (2006)
<b>Ésteres de ftalatos</b>			
Di-n-butil ftalato	0,7	0,15 0,62	Bright e Healey (2003) Bittencourt (2014)
Di (2-etilhexil)ftalato (DEHP)	1	19 0,51	Jones <i>et al.</i> . (2014) Bittencourt (2014)
Dimetil ftalato	0,25	0,13 0,41	Bright e Healey (2003) Bittencourt (2014)
<b>Fenóis não clorados</b>			
Cresóis	0,16	0,08 – 140 0,011 – 0,447	Bright e Healey (2003) Bittencourt (2014)
<b>Fenóis clorados</b>			
2,4-Diclorofenol	0,031	0,056	Bright e Healey (2003)
2,4,6-Triclorofenol	2,4	0,369	Bittencourt (2014)
Pentaclorofenol	0,16	0,015 0,139	Bright e Healey (2003) Bittencourt (2014)
<b>Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos</b>			
Benzo(a)antraceno	0,025	2,6	Cai <i>et al.</i> (2007)
Benzo(a)pireno	0,052	0,38	Jones <i>et al.</i> (2014)
Benzo(k)fluoranteno	0,38	0,38 1,2	Jones <i>et al.</i> (2014) Cai <i>et al.</i> (2007)
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	0,031	0,050	Cai <i>et al.</i> (2007)
Naftaleno	0,12	0,43 0,49 0,71	Jones <i>et al.</i> (2014) Cai <i>et al.</i> (2007) Bright e Healey (2003)
Fenantreno	3,3	2,2 2,0 0,133	Cai <i>et al.</i> (2007) Bright e Healey (2003) Bittencourt (2014)
Lindano	0,001	ND - 70	Harrison <i>et al.</i> . (2006)

Fonte: Própria autora (2017).

### 3.1.3 Aspectos legais

Para Boina (2012) a criação de Leis e Regulamentos brasileiros relacionados ao lodo de esgoto surgiu com a necessidade de proteção do meio ambiente e, com essa demanda, tornou-se possível o estabelecimento de padrões de lançamento e disposição final contribuindo assim para o controle da poluição e contaminação. A Tabela 08 mostra um resumo de Normas, Legislações e Resoluções que abordam direta ou indiretamente o lodo de esgoto.

Tabela 8 – Aspectos legais relacionados ao lodo de esgoto.

<b>Legislações, Norma, Resolução</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Sobre lodo de esgoto</b>
NBR 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação (2004)	Classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.	Lodo de esgoto pode ser classificado como resíduo sólido visto que não pode ser disposto na rede pública de esgotamento sanitário e nos corpos d'água ou exige soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.
LEI Nº 6.938 – Política Nacional de Meio Ambiente (1981)	Preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana.	No anexo VIII - Atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais, que lista as atividades que são sujeitas passivos da Taxa de Controle Fiscalização Ambiental, na categoria serviço de utilidade está como médio o potencial de poluição e o grau de utilização de recursos naturais de resíduos de esgotos sanitários.
LEI Nº 9.605 – Lei dos Crimes Ambientais (1998)	Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências,	No Capítulo V prevê pena de reclusão de até cinco anos se o crime ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos, ou detritos, óleos ou substâncias oleosas, em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos.
LEI Nº 11.445 – Política Nacional de Saneamento Básico (2007)	Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico.	Tem como um dos princípios básicos o manejo dos resíduos sólidos realizados de formas adequadas à saúde pública e à proteção do meio ambiente.
LEI Nº 12.305 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010)	Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.	No art, 13, item I, alínea “e” classifica especificamente, quanto a origem, os resíduos dos serviços públicos de saneamento básico.

(continua)

Tabela 8– (Conclusão).

Norma, Legislação, Resolução	Objetivo	Sobre lodo de esgoto
LEI Nº 12.932 – Política Estadual de Resíduos Sólidos - PERS (2014)	Institui a PERS, dispondo sobre seus princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos, e estabelece normas relativas à gestão e ao gerenciamento integrados de resíduos sólidos, em regime de cooperação com o setor público, o setor empresarial e os demais segmentos da sociedade civil.	No Art. 12, item I, alínea “e” classifica especificamente, quanto a origem, os resíduos dos serviços públicos de saneamento básico.
Resolução Nº 375 CONAMA (2006)	Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.	Específica para o uso agrícola do lodo de esgoto traz, entre outros aspectos, os requisitos mínimos de qualidade do lodo de esgoto ou produto derivado destinado à agricultura, frequência de monitoramento, as culturas aptas a receberem lodo de esgoto ou produto derivado e as restrições locacionais e da aptidão do solo das áreas de aplicação.

Fonte: Própria autora (2017).

### 3.2 Compostagem de lodo de esgoto

Fernandes *et al.* (1999) afirmam que, na prática, a compostagem é um processo de transformação de resíduos orgânicos com características desagradáveis em um composto, que é um insumo agrícola, de odor agradável, fácil manipulação e com ausência de organismos patogênicos.

Outra definição da compostagem é apresentada por Carvalho (2001):

*“processo de bio-oxidação aeróbia, exotérmica, de um substrato orgânico heterogêneo no estado sólido, realizada por uma população complexa de microrganismos, caracterizada por ter como produto final água e CO<sub>2</sub>, com simultânea liberação de matéria orgânica que se estabiliza após maturação. A higienização do substrato é função da elevação da temperatura durante a fermentação e do tempo de exposição do substrato.”*

A Figura 02 ilustra o processo de compostagem de forma simplificada. Constata-se que os fatores que mais afetam o processo são a umidade e disponibilidade de oxigênio, além da temperatura resultante da atividade microbiana (Epstein, 1996).



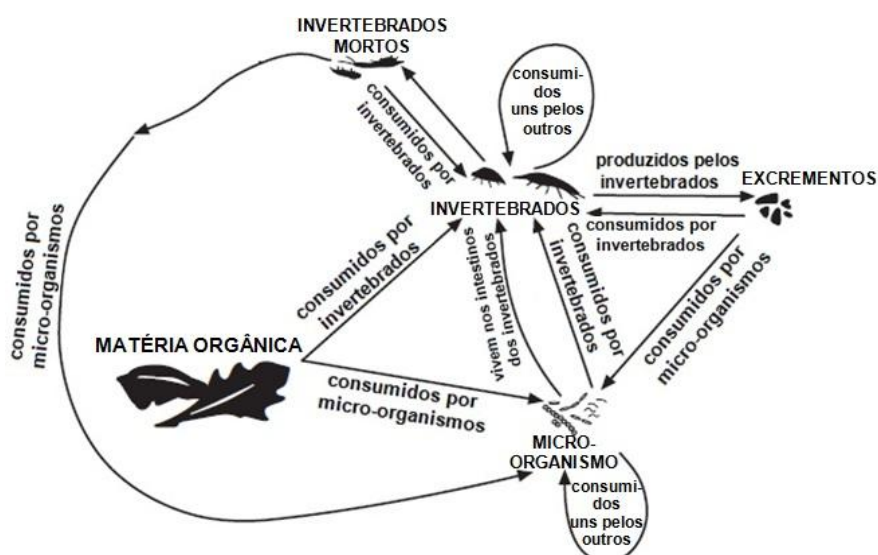
Figura 2 – O processo de compostagem.



Fonte: Epstein (1996).

Segundo Trautmann e Krasny (1998), não importa o sistema usado na compostagem, os organismos biológicos desempenham um papel central no processo de decomposição. Os mais importantes são os micro-organismos, porém vermes e outros invertebrados também são peças-chave em alguns tipos de compostagem. A Figura 03 mostra as interações alimentares entre os micro-organismos, invertebrados e a matéria orgânica.

Figura 3 – Interações alimentares dos organismos na compostagem.



Fonte: Trautmann e Krasny (1998).

A decomposição dos materiais durante a compostagem segue rotas bioquímicas comuns a qualquer outro processo de degradação. Normalmente, os substratos são biogênicos, ou seja, originados de atividade biológica (por exemplo, a fotossíntese). Isso significa, essencialmente, que todos os substratos disponíveis ou são de origem vegetal, animal ou de origem microbiana. Os materiais vegetais, geralmente, compõem percentuais mais elevados, enquanto que tecidos animais ou componentes microbianos são apenas frações de qualquer mistura, mas também são as mais ricas em nutrientes (Insam e de Bertoldi, 2007).

Barros (2012) mostra que existem diversos tipos de compostagem, inclusive alguns patenteados. O controle operacional do processo e a qualidade dos materiais que são compostados são os principais fatores que influenciam a eficiência do processo. Basicamente, há dois tipos de sistemas: aqueles que ocorrem dentro de um reator e os que ocorrem ao ar livre (geralmente, em leiras ou pilhas). O Quadro 01 mostra os tipos e as características dos processos.

Quadro 1 - Classificação e caracterização de processos de compostagem.

Tipos		Características
Quanto à biologia	Aeróbico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradação na presença de ar</li> <li>Alta temperatura da massa em decomposição</li> <li>Desprendimento de CO<sub>2</sub> e vapor d'água</li> </ul>
	Criofílico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixa temperatura de digestão: próxima ou inferior à temperatura ambiente</li> </ul>
Quanto à temperatura	Mesofílico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ocorre quando 40°C &lt; T &lt; 55°C, sendo que quanto maior a população de micro-organismos, maior a temperatura</li> <li>Transformação de matéria orgânica em ácidos inorgânicos, reduzindo pH</li> </ul>
	Termofílico	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ocorre quando 55°C &lt; T &lt; 70°C, proporcional à intensidade da atividade microbiológica e a determinadas condições de contorno</li> <li>Reduz condições de sobrevivência de formas vegetativas patogênicas, algumas bastantes termorresistentes</li> </ul>
Quanto ao ambiente	Aberto	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizada a céu aberto (em pátios)</li> </ul>
	Fechado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em dispositivos especiais (reatores): digestores, bioestabilizadores, torres, células</li> <li>Controle mais fácil</li> </ul>
Quanto ao processamento	Estático / natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revolvimento esporádico da massa em decomposição</li> </ul>
	Dinâmico / Acelerado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revolvimento contínuo da massa em digestão, favorecendo a aeração, a atividade biológica e seu controle</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Lima (1991), IPT (2000) (adaptados) *apud* Barros (2012).

A utilização da compostagem é considerada uma das formas mais eficientes na estabilização do lodo de esgoto, pois o composto originado é estável, rico em matéria orgânica e pode ser utilizada na agricultura em diversos tipos de cultivos de hortaliças, frutíferas, jardinagem e outras. Além disso, esse processo pode ser usado tanto para lodos digeridos, como nos mais diversos tipos de lodo bruto. Ademais, possui baixo custo e pode ser comercializado, o que acarreta a redução dos custos de tratamento de esgotos sanitários (Carvalho, 2001).

### **3.2.1 *Estado da arte das práticas recentes de compostagem de lodo de esgoto***

Por meio de uma revisão na literatura internacional sobre a compostagem de lodo de esgoto, na Tabela 09 foram sintetizados sistematizados alguns parâmetros fundamentais como: tipo (reator, leira aerada ou leira revolvida) e tamanho do sistema; tipo e umidade inicial do lodo; tipo de agente estruturante e/ou aditivo; umidade e relação C/N inicial da mistura e também a duração do experimento. Além desses, a temperatura foi avaliada segundo o maior pico encontrado no experimento do estudo e qual o tempo para alcançar a fase termófila (temperatura > 55°C).

Tabela 9 – Experiências com a compostagem de lodo e alguns parâmetros importantes

Autor (Ano)	Tipo	Tamanho (m³)	Tipo de lodo	Umidade inicial do lodo	Tipo de resíduo estruturante e/ou aditivo	Umidade inicial da mistura	Relação C/N inicial da mistura	Temperatura máxima atingida* (°C)	Tempo para alcançar temperatura > 55°C (dias)	Duração do experimento (dias)
ARIAS <i>et al.</i> (2012)	R	n.e.	Anaeróbio digerido	n.e.	Planta de <i>wetlands</i>	63	30,36	67	1	90
BONIECKI <i>et al.</i> (2012)	R	0,13	n.e.	83,5	Palha, serragem, casca grossa e fina, estacas, cânhamo	50 – 82	12 – 35	69	3	15
CHEN <i>et al.</i> (2014)	R	0,216	Desagüado	83,3	Palha e serragem	58,6	28,4	67	2	40
CUKJATI <i>et al.</i> (2012)	(I) LA (II) LR	(I) 5 (II) 420	Anaeróbio	76,7	Serragem fresca, lascas de madeira e casca de árvores	(I)67,6 - 69 (II)64,8 - 68,7	8,9 – 9,4	(I) 63 (II) 61	(I) 4 - 17 (II) 20 - 58	(I) 31 - 86 (II) 47 a 74
DOUBLET <i>et al.</i> (2011)	R	0,170	Aeróbio digerido	83,6	Composto verde, grama, galhos, casca, paletes e caule de milho	55,1 – 65,5	12,3 – 25,7	70	<14	84
EL FELLS <i>et al.</i> (2014)	LR	4	Ativado	46,46	Resíduo de palmeira	60	30	65	8-10	180
FOUNTOLAKIS <i>et al.</i> (2010)	LR	1	Anaeróbio digerido	72,1	Resíduos verdes	63,5	39	60	4	80
INGELMO <i>et al.</i> (2012)	R	0,065	Anaeróbio digerido	94,3	Lascas de madeiras	71,8	30,4	< 35	-	140
KOMILIS <i>et al.</i> (2011)	R	0,10	Desagüado	86 - 87	Papel, jornal, resíduo alimentar, serragens e galhos de árvores	56 – 85	8,3 – 30	68	2-3	40 - 57

(continua)

Tabela 9 – (continuação)

Autor (Ano)	Tipo	Tamanho (m³)	Tipo de lodo	Umidade inicial do lodo	Tipo de resíduo estruturante e/ou aditivo	Umidade inicial da mistura	Relação C/N inicial da mistura	Temperatura máxima atingida* (°C)	Tempo para alcançar temperatura > 55°C (dias)	Duração do experimento (dias)
KULI-KOWSKA e GUSIAIN (2015)	(I)R e (II)LR	(I) 1 e (II) ~1	Aeróbio	88	Lascas de madeiras, grama e palha	68,2 – 69,5	15,1 – 15,9	69 - 79	1 - 2	(I) 10 e (II) 170
KULI-KOWSKA e KLIMIUK (2011)	(I) R e (II) LR	(I) 1 e (II) 0,8	Aeróbio deságua-do	88,5	Lascas de madeira, palha e grama	72,4 – 74,1	12,2 – 15,2	72	3 - 5	(I) 10 e (II)170
LASHER-MES <i>et al.</i> (2012)	R	0,004	Aeróbio digerido	n,e,	Galhos, grama, poda de árvores e folhas	66	15,7	69,4	2 - 4	83
LI <i>et al.</i> , (2013a)	R	0,002	Desagua-do	86,6	Serragem e pó de palha	61,8 – 63,4	11,5 – 14,15	62	2	22
LI <i>et al.</i> (2013b)	R	n,e,	Desagua-do	84,6	Serragem e pó de palha	n,e,	n,e,	61	2 - 4	22
MALINSKA <i>et al.</i> (2014)	R	0,045	n.e.	81,2	Aparas de madeira e biomassa carbonizada	68,3 – 71,7	20 - 25	52	-	16
MAULINI-DURAN <i>et al.</i> (2013)	R	0,05	(A) Bruto (B)Anaeróbio digerido	(A) 78,9 (B) 82,9	Lascas de madeira	(A)63 – 68 (B)69,8 – 71,2	(A) 30,83 (B) 12,73	(A) 55 (B) 37	(A) 1 (B) -	12
NIKAEEN <i>et al.</i> (2015)	(I)LA (II)LR	(I)7,35 (II) 7,35	Anaeróbio digerido	75,3	Resíduo de poda e folhas de ciprestes e pinheiros	55,2 – 64,1	20,4 – 36,9	(I) 58 (II) 59	(I) 36 (B) 27 - 29	~107

(continua)

Tabela 9 – (Conclusão).

Autor (Ano)	Tipo	Tamanho (m³)	Tipo de lodo	Umidade inicial do lodo	Tipo de resíduo estruturante e/ou aditivo	Umidade inicial da mistura	Relação C/N inicial da mistura	Temperatura máxima atingida* (°C)	Tempo para alcançar temperatura > 55°C (dias)	Duração do experimento (dias)
RIHAN I <i>et al.</i> (2010)	R	4,00	Primário	67,9 - 72,2	Estrume, açúcar da folha de beterraba e palha	59,3 - 71,8	16,8 – 19,7	61	5 - 6	23 - 30
RODRÍGUEZ <i>et al.</i> , (2012)	R	0,10	Aeróbio digerido	83,97	Serragem em pó, maravalha, lascas de madeira, podas e resíduos de palha	60,23 – 78,80	7,44 – 29,87	70	2 - 3	12 - 15
SIDELKO <i>et al.</i> , (2010)	(I) R e (II)LR	(I) 0,125 (II) 4	Desaguado	80	Palha	n.e.	n.e.	74	1	(I)7 – 21 e (II) 142
VILLASENOR <i>et al.</i> (2011)	R	0,10	Anaeróbio digerido	78,8	Palha de cevada e zeólitos	50 – 70	29	68	1	90
WANG <i>et al.</i> (2011)	R	0,23	Primário e secundário	75	Pedra-pome	75	11,97	60	2	28
WU <i>et al.</i> (2015)	R	0,042	Desaguado	78,86	Pedra-pome	55,6 – 68,90	n.e.	53	-	25
ZHOU <i>et al.</i> (2014 <sup>a</sup> )	R	n.e,	n.e.	80,7	Plástico reciclável e composto maturado	n,e,	n.e.	73	1	10 – 16
ZHOU <i>et al.</i> (2014 <sup>b</sup> )	LA	297	n.e.	80,2	Serragem e composto	65	n.e.	58	1	12

**Legenda:** R (reator), LR (leira revolvida) e LA (leira aerada), n.e. (não especificado).

\*maior temperatura considerando todos experimentos.

\*\* As referências mostram resultados globais e médios de um conjunto de experiências sobre a utilização da compostagem de lodo de esgoto em um determinado estudo.

Fonte: Própria autora (2017).

### 3.2.1.1

#### *Tamanho e tipo do sistema*

Quanto ao volume de resíduos compostados, houve predominância de volumes com tamanhos menores ou iguais a 1,0 m<sup>3</sup>. Isso pode estar relacionado ao fato de que, nos artigos avaliados, diversos experimentos foram realizados alterando alguma variável e estudando o que representa essa mudança, sendo assim houve predominância em uso de sistemas menores, principalmente, utilizando reatores.

No maior sistema encontrado, Cukjati *et al.* (2012) salientaram a importância de operar sob condições normais para investigar as melhores condições ao longo do período da compostagem em condições extremas do verão e do inverno e observaram que a taxa de mineralização da matéria orgânica e a fase termófila foi alcançada em todos períodos, apesar do inverno rigoroso.

Por outro lado, Lashermes *et al.* (2012) estudaram um novo dispositivo experimental de pequena escala com apenas 4 litros de amostra composta de lodo e resíduos verdes a fim de avaliar o desempenho e a sua reprodutibilidade sobre as transformações químicas e bioquímicas da matéria orgânica. Os autores concluíram que apesar das dificuldades inerentes de miniaturização do processo, a compostagem realizada nesse reator de pequena escala é representativa, podendo utilizá-lo, por exemplo, em estudos sobre degradação de poluentes orgânicos.

Dentre os trabalhos avaliados, há uma predominância do uso de reatores, provavelmente, pelo fato de ser um sistema que permite maior controle de parâmetros importantes como aeração e temperatura, inclusive utilizando *softwares* como no trabalho de Rihani *et al.* (2010) que usou um sistema de controle da agitação, aeração e hidratação, o de Chen *et al.* (2014) que instalou um temporizador para controlar o nível de oxigênio e também nos trabalhos de Kulikowska e Klimiuk (2011) e Kulikowska e Gusiatin (2015) que utilizaram o mesmo reator (na primeira fase dos experimentos) com um sistema de aeração que regulava a quantidade de ar fornecida.

Doublet *et al.* (2011) utilizaram um reator com aeração forçada que era acionado por meio da temperatura e concentração de O<sub>2</sub>, para manter uma temperatura elevada o máximo de tempo possível e a concentração de O<sub>2</sub> entre 13 e 18%. Da mesma forma, Zhou *et al.* (2014b) adotaram um processo de aeração forçada estática, com

uma estratégia de aeração por meio do controle automático ajustado nas diferentes fases do processo de compostagem com base na temperatura e taxa de consumo de oxigênio, por meio de um sistema denominado *Compssoft*<sup>®</sup> 3.0.

Outro método utilizado foram leiras revolvidas como, por exemplo, nos trabalhos de Fountoulakis *et al.* (2010) e El Fels *et al.* (2014). Porém, vale salientar que, no trabalho de Fountoulakis *et al.* (2010), foi utilizado um sistema que, na verdade, simulava o método de leiras revolvidas, pois o processo ocorreu em caixas metálicas abertas na parte superior e perfuradas na parte inferior e laterais que eram revolvidas periodicamente.

Outros trabalhos conduziram o processo alternando um período em reator e outro em leiras. Os trabalhos de Sidelko *et al.* (2010), Kulikowska e Klimiuk (2011), e de Kulikowska e Gusiatin (2015) seguiram esse modelo com a fase termófila realizada no reator e a fase de maturação na leira revolvida. Por outro lado, os experimentos de Nikaeen *et al.*, (2015) buscaram realizar uma comparação entre os sistemas de leiras aeradas e revolvidas por meio da análise das diferenças físicas, químicas e biológicas de misturas de lodo e resíduos estruturante semelhantes e seus resultados sugerem a utilização das leiras revolvidas em detrimento das leiras aeradas. Da mesma forma, Cukjati *et al.* (2012), também analisaram os sistemas de leiras aeradas em menor escala (5 m<sup>3</sup>) e de leiras revolvidas em maior escala (420 m<sup>3</sup>) e todos os seus experimentos, inclusive aqueles realizados no inverno, alcançaram a fase termófila.

Zhou *et al.* (2014b), dentre os artigos analisados, foram os únicos que trabalharam apenas com leira aerada, e tiveram como um dos objetivos comparar a influência das variações sazonais entre o inverno e verão sobre o processo de compostagem a fim de otimizar a estratégia de aeração, sobretudo no inverno onde ocorrem menores temperaturas e, conseqüentemente, menor remoção de água e decomposição de matéria orgânica. Os autores chegaram à conclusão de que pode ser necessário tomar medidas de isolamento térmico do processo para que a temperatura do ar não influencie a compostagem.



### 3.2.1.2

#### *Tipo e umidade inicial do lodo*

Dentre os trabalhos estudados, diversos tipos de lodo foram utilizados: anaeróbio, aeróbio, bruto, lodo ativado, etc. Além disso, a maioria dos trabalhos adotou apenas um tipo de lodo para os experimentos (Fountoulakis *et al.*, 2010; Villasenor *et al.*, 2011; El Fels *et al.*, 2014), porém houve um trabalho que optou por uma mistura de tipos distintos de lodo (Wang *et al.*, 2011) ou por realizar uma análise comparativa de dois tipos de lodo, como o de Maulini-Duran *et al.* (2013), que mostrou que o lodo anaeróbio emite mais metano e óxido nitroso que o lodo bruto e esse emite mais amônia e composto orgânicos voláteis durante a compostagem. Por fim, alguns trabalhos não especificaram o tipo do lodo utilizado (Boniecki *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2014a; Zhou *et al.*, 2014b e Malinska *et al.*, 2014).

Quanto à umidade inicial do lodo, parâmetro que foi analisado em quase todos os estudos, os trabalhos de Kulikowska e Klimiuk (2011), Li *et al.* (2013a e 2013b), Chen *et al.* (2014) e Wu *et al.* (2015) destacaram a utilização de lodo desaguado, porém não especificaram qual o tipo de processo de desidratação foi previamente realizado. Vale destacar que Li *et al.* (2013a e 2013b) relataram o uso de lodo desaguado mas, mesmo assim, expuseram a importância da utilização da serragem devido aos valores elevados de umidade, além de condições aeróbias precárias.

Sidelko *et al.* (2010) especificaram a importância da etapa de desaguamento devido a preocupação com a instabilidade do lodo de esgoto e salientaram a necessidade de condicionamento do lodo através da adição de polieletrólito e, também, a desidratação mecânica em um filtro-prensa a fim de atingir um teor de umidade de 80%. Da mesma forma, Komilis *et al.* (2011) e Maulini-Duran *et al.* (2013) mencionaram a existência de uma etapa de desaguamento que foi realizada com o filtro prensa e centrifugação, respectivamente.

### 3.2.1.3

#### *Tipo de resíduo estruturante e/ou aditivo*

O resíduo estruturante é fundamental na compostagem de lodo de esgoto, pois esse contém partículas pequenas e alta umidade e, para equilibrar o processo, é necessário escolher um tipo de resíduo capaz de diminuir a umidade e aumentar os espaços vazios. Outra importância do resíduo estruturante é sua utilização como

forma de garantir uma fonte extra de carbono visto que o lodo possui uma relação C/N muito baixa, por isso, há a necessidade de buscar materiais biodegradáveis.

Uma distinção interessante sobre os resíduos estruturantes é fornecida por Kulikowska e Gusiatin (2015), trazendo a diferença entre os chamados *amendments agents* que seriam aqueles que auxiliam na umidade e na relação C/N e os *bulking agents* que se refere aos que conferem porosidade e estrutura.

Diante desse conceito, o trabalho de Villasenor *et al.* (2011) é um exemplo da diferença dos chamados *amendments agents* e dos *bulking agents*, pois os pesquisadores utilizaram a palha de cevada para obter um teor de umidade e a relação C/N ótimos e diferentes tipos de zeólitos para conferir porosidade à mistura. Os resultados mostraram que, possivelmente, os zeólitos melhoraram a degradação da matéria orgânica, diminuiu a temperatura e a umidade além de reter amônia no composto.

Outro estudo que destacou a diferença entre *amendments agents* e *bulking agents* foi o de Malinska *et al.* (2014). Os autores utilizaram lascas de madeiras como *bulking agent* e o *biochar* como *amendment agent* e o objetivo desse trabalho foi estudar o efeito da adição de *biochar* na emissão de amônia e perda de nitrogênio durante a compostagem da mistura com lodo de esgoto e lascas de madeiras. Os resultados encontrados mostraram que a adição da biomassa carbonizada reduziu de forma significativa a volatilização de amônia durante a primeira semana do experimento, além de aumentar a temperatura e decomposição da matéria orgânica durante a compostagem em escala laboratorial.

Li *et al.* (2013a) realizaram seu estudo com o objetivo de observar o que eles denominam *amendments rich-carbon* (compostos ricos em carbono) tais como glicose, sacarose, pó de palha e misturas de pó de palha com sacarose ou glicose na emissão de amônia e discutiram a interação entre a taxa de degradação de compostos de carbono e as emissões de amônia. Porém, vale ressaltar que, os autores utilizaram como *bulking agent*, a serragem devido ao excesso de umidade do lodo de esgoto e para garantir os espaços vazios na mistura, ignorando a ausência da matéria orgânica solúvel nesse material, sobretudo quando comparado com o lodo de esgotos e os outros compostos ricos em carbono, pois a serragem possui alto teor de lignina e celulose que são difíceis de decompor. Seus resultados

mostraram que a glicose e sacarose, fontes de carbono disponível rapidamente, foram mais eficazes que o pó de palha, material mais resistente, na degradação biológica do carbono e redução das emissões de amônia.

Materiais como palha, poda, serragem, lascas de madeiras e resíduos verdes, em geral, são comuns nos estudos analisados. Porém, houve o estudo de Zhou *et al.* (2014a) que possuíam a preocupação com a disponibilidade desses materiais e utilizaram um novo agente estruturante plástico que pode ser peneirado para ser reutilizado. Nesse estudo, os autores avaliaram a influência do diâmetro e da proporção que o agente estruturante plástico foi adicionado ao lodo, chegando à conclusão que a utilização desse agente melhora a difusão do oxigênio e a desidratação durante o processo de compostagem.

Outro estudo que utilizou um resíduo estruturante diferente foi o de Wang *et al.* (2011). Os autores consideram o agente estruturante como sendo o “esqueleto” da compostagem e, por isso, propuseram o uso pioneiro de pedras-pomes como agente estruturante inorgânico por sua capacidade de absorver água durante o processo de compostagem e controlar a umidade média da mistura. Seus resultados mostraram que a pedra-pome pode ser utilizada no processo de compostagem de forma satisfatória devido a sua elevada porosidade, baixa densidade, alto potencial de retenção da água e boa compressibilidade.

No ano de 2015, Wu *et al.*, realizaram um estudo que teve como objetivo investigar o efeito da reutilização de pedras-pomes sobre o processo de compostagem em termos de perda de nitrogênio e taxa de degradação biológica. Seus resultados mostraram que as pedras-pomes podem ser reutilizadas como meio suporte para o inóculo para promover a degradação da matéria orgânica e a redução significativa da emissão de amônia.

Doublet *et al.* (2011) propuseram investigar a influência do agente estruturante (composto verde, grama, galhos, casca, paletes e caule de milho) sobre a evolução da compostagem de lodo e as consequências para a estabilidade da matéria orgânica e nitrogênio disponível no composto final. Os autores concluíram que o tipo de resíduo teve pouca influência sobre a intensidade da estabilização da matéria orgânica durante a compostagem e disponibilidade de nitrogênio no composto final, porém influenciaram o tempo necessário para atingir estabilidades semelhantes e

dependendo da natureza bioquímica do agente estruturante, poderia haver aumento da disponibilidade de nitrogênio nos compostos finais.

Também com o objetivo de estudar a influência de diferentes tipos de resíduos estruturantes (serragem em pó, maravalha, lascas de madeira, podas e resíduos de palha), Rodriguez *et al.* (2012) verificaram o nível de eficiência da fase termófila e, conseqüentemente, a redução do tempo do processo de compostagem de lodo de esgoto. Os resultados encontrados evidenciaram que o tipo de agente estruturante tem influência significativa sobre a temperatura, e nesse estudo a maravalha forneceu os melhores resultados. Ademais, após a escolha do resíduo, foi analisada também a melhor proporção lodo/agente, em peso úmido: 2:1; 3:1; 4:1 e 9:1. O estudo mostrou que tanto a proporção 3:1 quanto a 4:1 são adequadas para compostagem. Já a proporção 2:1 parece ter provocado um efeito de resfriamento excessivo e na relação 9:1 não foi detectada nenhuma atividade biológica significativa mostrando que um mínimo de agente estruturante é necessário para garantir porosidade adequada e, conseqüentemente, transporte de oxigênio.

Maulini-Duran *et al.* (2013) apontaram a necessidade de uma elevada proporção lodo/resíduo em volume (1:3) para ajustar o teor de umidade, porém o alto teor de agente estruturante contribuiu para baixar a atividade biológica da mistura. Niakeen *et al.* (2015) também conseguiram melhores resultados adotando uma relação lodo/resíduo em volume de 1:3, porém seus resultados mostraram maiores atividades biológicas nessa pilha devido a um melhor arejamento e maior relação C/N quando comparado com a que tinha a relação 1:1.

A fim de minimizar o uso de resíduos estruturantes por questões econômicas, Cukjati *et al.* (2012) variaram a relação resíduo/lodo em volume de 1:1 a 6,2:1 para avaliar a viabilidade do processo. Além disso, destacaram que os resíduos (cascas e lascas de madeiras, serragem) utilizados nos experimentos eram frescos e de origem local. Seus resultados mostram que uma relação lodo/resíduo de 3:1, mais alta que a habitual 1:3 produziu resultados satisfatórios.

#### 3.2.1.4

#### *Umidade e relação C/N inicial da mistura*

Kulikowska e Gusiatin (2015) consideraram a umidade e a relação C/N os fatores mais importantes para a eficiência do processo de compostagem. Esses autores

salientaram que o teor de umidade na compostagem deve garantir uma quantidade de água adequada para garantir a mortalidade dos micro-organismos e transporte de nutrientes, além de adequado fluxo de oxigênio para manter as condições aeróbias, sendo o teor ótimo entre 40 e 60%. Os autores consideram ainda a relação C/N o segundo parâmetro fundamental, pois o carbono e o nitrogênio são os principais nutrientes e estando em proporção apropriada, os outros nutrientes também tendem a estarem presentes na proporção adequada. Dessa forma, para que a compostagem ocorra mais rapidamente é recomendada uma proporção carbono/nitrogênio de 20-30/1.

Esses teores ótimo de umidade e relação C/N também foram adotados por El Fels *et al.* (2014) assim como por Arias *et al.* (2012), mas, segundo as análises realizadas, obtiveram 63% de umidade, um pouco acima do limite superior e, para a relação C/N, os autores encontraram valores muito próximo do considerado ideal 30:1.

Ingelmo *et al.* (2012) preocuparam-se em ajustar os teores de umidade e a relação C/N da mistura, ou seja, a umidade em 60% quanto a relação C/N em 30:1. No início dos seus experimentos a relação C/N era 30,4:1 e ao fim de 140 dias, essa relação diminuiu, mas ainda foi considerada alta 21,6:1. Quanto à umidade, os autores iniciaram o processo com 71,8% de umidade, valor acima da faixa considerada ótima e, ao fim do processo, a umidade reduziu pouco chegando a 68,8%.

Corroborando com Kulikowska e Gusiatin (2015), Niakeen *et al.* (2015) consideram a umidade um fator crítico para a compostagem de resíduos com elevados teor de umidade, como o lodo de esgoto, pois proporciona um meio para o transporte de nutrientes dissolvidos necessários para os micro-organismos. Além disso, a relação C/N inicial pode ser um fator que exerce influência sobre a estabilidade do composto.

Outro fato pertinente destacado por Doublet *et al.* (2011) quanto à relação C/N é que deve ser suficientemente grande para evitar as perdas de nitrogênio por volatilização. Porém, Li *et al.* (2013a), salientaram que apesar das emissões de amônia se relacionarem com a relação C/N inicial da mistura, há uma grande importância em utilizar fontes de carbono com composições mais fáceis de degradar para garantir a eficácia da redução da emissão de amônia. Os resultados mostraram que a capacidade de imobilização do nitrogênio dependeu fortemente da

composição da fonte de carbono, sendo assim, a relação C/N não era suficiente para explicar a imobilização do nitrogênio. Vale destacar que os achados obtidos são limitados a escala laboratorial, quando se pensa em compostagem em grande escala deve-se atentar às consequências econômicas da introdução de fonte externa de carbono.

No experimento de Fountoulakis *et al.* (2010) a água foi, ocasionalmente, adicionada durante o revolvimento, e, em uma dessas adições, a umidade esteve fora da faixa ótima, o que resultou em uma certa inibição do processo que foi restabelecido após a umidade retornar ao valor ótimo. O trabalho de Rodriguez *et al.* (2012) destacou que o teor umidade inicial desempenha um papel importante sobre as mudanças da temperatura ao longo do processo de compostagem e que deve ser menor que 65-66% para garantir higienização adequada do composto.

Como citado anteriormente, nos estudos de Villasenor *et al.* (2011) que tinham como objetivo estudar os efeitos da adição de zeólitas na compostagem de lodo, os autores utilizaram palha de cevada para obter um teor de umidade entre 65-80% e relação C/N de 29, ou seja, para obter teores ótimos do processo. Os autores afirmam que água foi adicionada apenas quando uma queda de umidade foi observada, principalmente, na fase termófila durante a qual, em alguns experimentos, quantidade considerável de água foi evaporada e teve que ser reposta.

Rihani *et al.* (2010), por meio da realização de análises diárias, ajustaram a quantidade de água para que o teor de umidade ficasse entre 40 e 50%. Como a relação C/N do lodo é muito baixa, utilizaram resíduos verdes para aumentá-la para um nível ideal e, também, para compensar o carbono de difícil degradação presente no lodo de esgoto.

Para Komilis *et al.* (2011) a umidade e relação C/N inicial da mistura são parâmetros de projeto e tiveram como um dos objetivos estudar a influência da umidade e da relação C/N inicial no processo de compostagem e os resultados mostraram que esses parâmetros não se correlacionaram significativamente com a degradabilidade da mistura, porém quando analisada a relação carbono biodegradável/nitrogênio houve uma correlação significativa com a biodegradabilidade, ou seja, o importante seria o carbono que pode ser biodegradado e não o carbono total.

Wang *et al.* (2011) utilizaram pedra-pome como agente estruturante, pois preocuparam-se com a elevada umidade do lodo e sabendo que a pedra-pome possuía umidade de apenas 8% e que sua capacidade de absorção de água foi 51-72%, levou os pesquisadores a investigar seu uso na compostagem de lodo. Nos experimentos de Kulikowska e Klimiuk (2011), devido à baixa porosidade e relação C/N além da alta umidade, o lodo foi misturado com materiais ricos em lignina e celulose pra equilibrar as proporções e aumentar os espaços vazios.

### 3.2.1.5 *Temperatura máxima atingida e tempo para alcançar temperatura > 55°C*

Os picos de temperatura obtidos nos experimentos foram um dos fatores investigados nos trabalhos, pois estão diretamente relacionados ao equilíbrio do processo e com a segurança microbiológica do produto final. Outro ponto importante foi o tempo para alcançar temperatura maior que 55°C, ou seja, o momento em que alcançou à fase termófila.

Apesar de alguns autores (Wang *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013b; Nikaeen *et al.*, 2015) considerarem que a fase termófila ocorre quando a temperatura encontra-se acima de 50 °C, nessa revisão, buscou-se valores mais conservadores e em concordância com outros autores que adotaram temperaturas superiores a 55°C como início da fase termófila (Cukjati *et al.*, 2012; Kulikowska e Gusiatin, 2015).

Rodriguez *et al.* (2012) reportaram nos seus resultados que o valor de pico de temperatura aumentava com a diminuição da concentração de oxigênio na massa compostada. Além disso, utilizar como resíduo estruturante a maravalha foi a opção que trouxe melhor resultado em termos de elevação da temperatura, pois conseguiu-se manter a temperatura acima de 55°C por pelo menos três dias. Resultados semelhantes foram encontrados por Maulini-Duran *et al.* (2013), ou seja, o valor de pico de temperatura ocorreu com menor teor de oxigênio. Ademais, na compostagem de lodo bruto esses autores obtiveram o valor de pico de temperatura mais rapidamente, diferente da compostagem de lodo anaeróbio que não conseguiu atingir a fase termófila.

Kulikowska e Klimiuk (2011) relataram que o aumento da temperatura no reator depende da temperatura inicial e da taxa de transformação dos substratos

rapidamente disponíveis. Ademais, altas temperaturas favorecem o crescimento de micro-organismos responsáveis pela decomposição de lignocelulose e a formação de precursores de húmus.

No estudo de Villasenor *et al.* (2011) foram encontrados picos de 68°C em um período de tempo muito curto sem utilizar como agente estruturante a zeólita levando a concluir que a zeólita pode reduzir o potencial de auto-aquecimento, pois permite maiores transportes de massa e energia para atmosfera através dos espaços vazios. Além disso, em todos os experimentos, a diminuição do oxigênio foi detectada durante o período de temperaturas máximas.

Kulikowska e Gusiatin (2015) mostraram que a intensidade da aeração afeta tanto a duração da fase termófila quanto o pico de temperatura. Os autores encontraram um rápido aumento de temperatura em todos os experimentos o que significa que os compostos orgânicos facilmente biodegradáveis foram intensamente decompostos. Assim como El Fels *et al.* (2014) que em seus experimentos constataram temperatura de 65°C no início do processo, o que indica uma intensa atividade microbiana resultante da degradação das moléculas simples presentes no substrato.

Em quase todos os experimentos realizados por Doublet *et al.* (2011), a temperatura chegou a valores superiores a 70°C na primeiras duas semanas, após esse período foi para 45-55°C e diminuiu lentamente até o fim do processo. Arias *et al.* (2012) obtiveram a fase termófila rapidamente com o pico de, aproximadamente, 67°C.

Niakeen *et al.* (2015) encontraram uma variação de temperatura típica do processo de compostagem e a adoção de sistemas diferentes de aeração mostrou mudanças de temperatura distintas. Já Fountoulakis *et al.* (2010) encontraram perfis de temperatura bastante semelhantes em seus experimentos, indicando que a adição de herbicidas na massa de resíduo a ser compostada não influenciou o processo de compostagem.

Para manter a temperatura alta durante a fase termófila, Lashermes *et al.* (2012) realizaram o controle de temperatura, visto que é comum em reatores de pequena escala a queda rápida da temperatura. Sendo assim, os autores ajustaram a temperatura para um determinado perfil a fim de se aproximar da temperatura dinâmica da compostagem, mantendo a fase termófila ao longo de três dias que foi considerado o tempo mínimo necessário para higienização dos patógenos.



Chen *et al.* (2014) utilizaram um reator com aeração forçada e observaram a influência da energia solar, através de dispositivo com aquecimento solar e também utilizando uma estufa para verificar o efeito na temperatura sobre a qualidade do composto. Seus resultados mostraram que a utilização de aquecimento solar garantiu temperaturas mais estáveis para o processo, com redução do carbono orgânico total e diminuição da perda de nitrogênio quando comparados ao reator isolado ou coma estufa.

Um dos poucos estudos que não atingiu temperaturas superiores a 55°C foi o de Ingelmo *et al.* (2012). Em seus experimentos, os picos máximos encontrados não eram maiores que 35°C, os autores creditaram isso ao fato do lodo ter sido misturado com lascas de madeira que não são facilmente degradáveis por conter uma relação lignina/tanino alta.

#### 3.2.1.6 *Duração do experimento*

Dentre os trabalhos avaliados houve grande variação da duração dos seus experimentos sendo o menor período de 10 dias (Zhou *et al.*, 2014a) e o maior de 180 dias (Kulikowska e Klimiuk, 2011; Kulikowska e Gusiain, 2015; El Fels *et al.*, 2014).

Zhou *et al.* (2014a) realizaram testes de germinação que indicaram que os compostos gerados em seus experimentos não eram fitotóxicos e apresentaram índices superiores que os de lodo sem tratamento mesmo com o curto período de compostagem.

O estudo de Rodriguez *et al.* (2012) teve como objetivo otimizar apenas a fase termófila, sendo assim, conduziram seus experimentos entre 12 e 15 dias, dependendo da evolução de cada um deles, em relação ao desenvolvimento dessa etapa do processo.

Sidelko *et al.* (2010) tiveram como objetivo determinar a relação entre a duração da fase termófila ocorrendo em um reator com intenso revolvimento e aeração forçada e a fase de maturação do composto em leiras revolvidas. Para isso, os autores variaram a duração do processo no reator de 7 a 21 dias e mantiveram a fase de maturação por 142 dias para todos experimentos. Os resultados sugeriram que

manter a mistura no reator por um período superior a 18 dias é ineficiente, uma vez que não reduz significativamente a duração da fase seguinte de maturação.

Apesar da duração do experimento relativamente alta (comparada com os outros trabalhos em reator) Ingelmo *et al.* (2012) obtiveram um composto com relação C/N relativamente alta (21,6/1) e baixa estabilização da matéria orgânica considerando a predominância dos ácidos fúlvicos sobre os ácidos húmicos, porém as concentrações de metais pesados foram abaixo do máximo permitidos para aplicação no solo.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

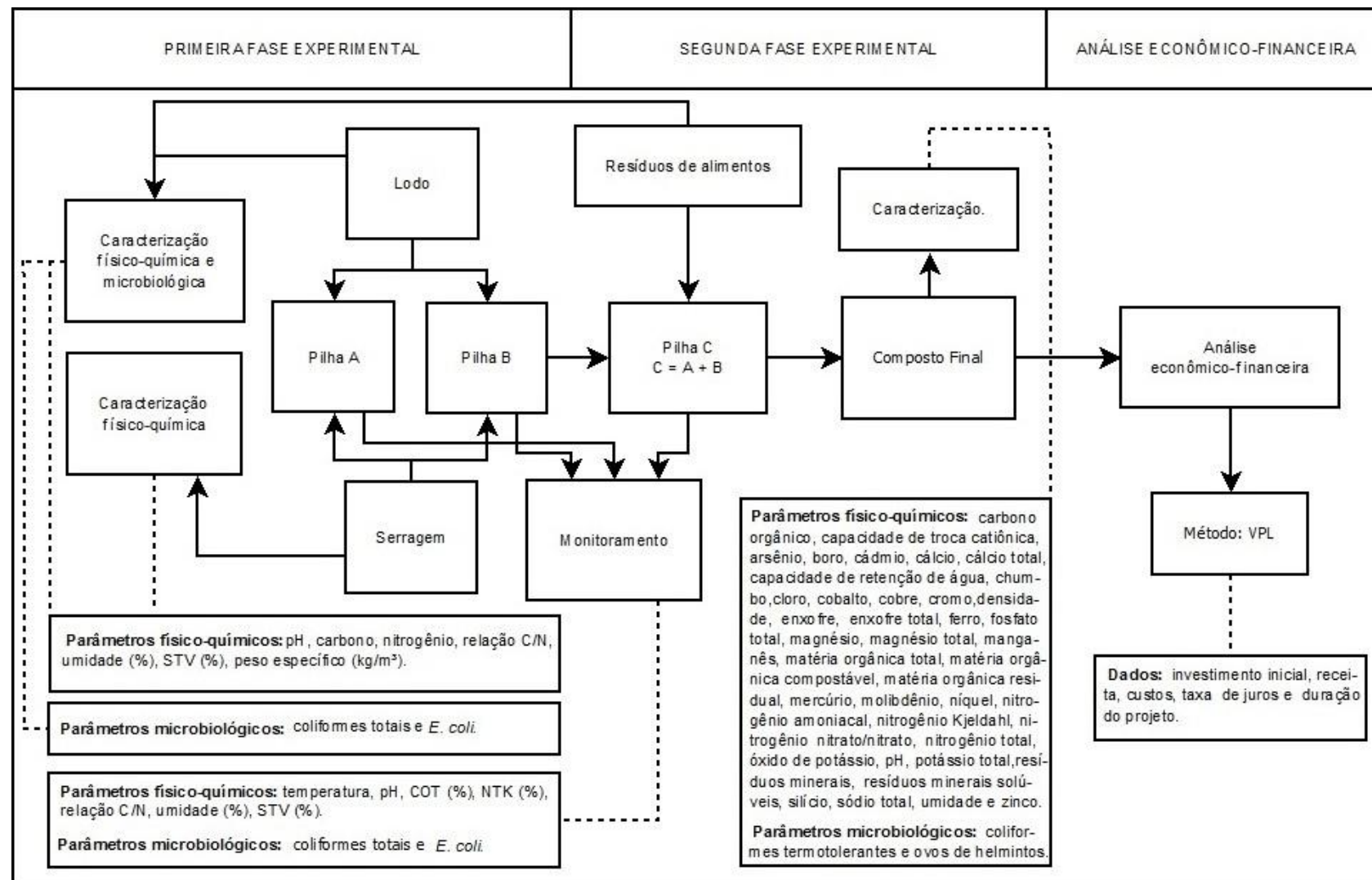
### 4.1 Descrição geral da pesquisa

A pesquisa para avaliação da compostagem como destinação e valorização de lodo oriundo de reator UASB foi conduzida em duas fases distintas. Na primeira fase da pesquisa, avaliou-se o processo de compostagem de lodo anaeróbico oriundo de reator UASB juntamente com a serragem como *bulking agent* e, na segunda fase, foi adicionado os resíduos de alimentos como *amendment agent* a fim de verificar o manejo, o comportamento do processo e limitações para atender as normas vigentes no Brasil.

Além disso, foi analisada a viabilidade econômica-financeira para a adoção do processo de compostagem como forma de destinação final de lodo desidratado de reator UASB de uma ETE descentralizada implantada em um empreendimento habitacional cuja população é igual a 1.100 habitantes.

A parte experimental foi realizada na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia no galpão anexo do Laboratório Experimental de Saneamento 4 (LABEXSAN 4) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental localizado à latitude de 12° 59' S, longitude 38° 30' O e altitude de 58m. O início do experimento foi em 23/08/2016 e o término no dia 09/01/2017, totalizando 140 dias de experimento. A Figura 04 apresenta, de forma resumida, as etapas da pesquisa.

Figura 4 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Própria autora (2017).

## 4.2 Primeira fase: Processo de compostagem utilizando lodo anaeróbio de esgoto e serragem como bulking agent

A primeira fase consistiu na montagem das pilhas misturando o lodo anaeróbio de esgoto com a serragem a qual foi utilizada como *bulking agent* a fim de avaliar o processo de compostagem.

### 4.2.1 Monitoramento do Processo

As análises dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos foram realizadas em triplicata na caracterização inicial consistiram em análises de carbono orgânico total nitrogênio total Kjeldahl, umidade, sólidos voláteis, pH dos resíduos (lodo e serragem). O lodo foi caracterizado quanto à presença e concentração de coliformes totais e *E. coli*. O acompanhamento ao longo do processo foi de acordo com a frequência e métodos descritos nesse item.

#### 4.2.1.1 Parâmetros físicos e químicos

A amostra composta foi retirada do experimento logo após o revolvimento e cada alíquota tinha, aproximadamente, 400g por experimento a cada semana, para realização das análises em triplicata, exceto a análise de Carbono Orgânico Total que apenas uma amostra por semana foi analisada. Os parâmetros de monitoramento são listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros e frequências de monitoramento da pesquisa

Parâmetro	Frequência	Método	Equipamento
Temperatura	Diária	Direto	Termômetro Digital
pH	Semanal	Potenciométrico	pHmetro
Teor de umidade	Semanal	Gravimétrico – Secagem a 105°C	Estufa CAF
Sólidos Totais voláteis	Semanal	Gravimétrico – Calcinação a 550°C	Mufla
Carbono orgânico total	Quinzenal	Detector de infravermelho não dispersivo de radiação focalizada	AnalytikJenaMulti N/C 2100S
Nitrogênio total Kjeldahl	Semanal	Kjeldahl – Digestão /Destilação	Bloco digestor / destilador Buchi

Fonte: Própria autora (2017).

## 4.2.1.2

*Parâmetros microbiológicos*

No presente trabalho, o monitoramento dos parâmetros microbiológicos do processo nas duas fases foi através das análises de coliformes totais e *Escherichia Coli*.

É importante salientar que nem todas as bactérias do grupo coliformes tem origem fecal. Dentro do grupo de coliformes, há um subgrupo denominado coliformes termotolerantes que são utilizados para identificar contaminação de origem fecal, porém incluem algumas cepas de origem não fecal. A *E. coli* está incluída no subgrupo de coliformes termotolerantes, entretanto possui origem especificamente fecal, sendo raramente encontrada em locais não contaminados com material fecal (Silva *et al.*, 2005 *apud* Marquezi, 2010).

Inclusive, a Resolução CONAMA 357/2005 que classifica e enquadra os corpos d'água, permite a determinação da *E. coli* em substituição ao parâmetro de coliformes termotolerantes de acordo com os limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente. Além disso, a Portaria MS 2914/2011, que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, sequer traz como opção de controle utilizar o indicador coliformes termotolerantes, apenas exige a determinação de *E. coli* e coliformes totais.

Sendo assim, por nem todos micro-organismos do subgrupo coliformes termotolerantes serem de origem fecal e, como relatado no trabalho de Marquezi (2010), a contagem desse subgrupo ser sempre maior que a de *E. coli*, podendo assim superestimar a contaminação, é importante que na próxima revisão da Resolução CONAMA 375/2006, que deveria ter ocorrido no sétimo ano de sua publicação, haja a inserção da *E. coli* ao menos como opção ao parâmetro de coliformes termotolerantes.

Nesse trabalho, para quantificação dos parâmetros microbiológicos, foram realizadas análises de coliformes totais, coliformes termotolerantes e *E. coli* conforme a metodologia mostrada na Tabela 11.

Tabela 11 - Classe de lodo de esgoto ou produto derivado - agentes patogênicos

Parâmetro	Método	Referência
Coliformes totais e <i>E. Coli</i>	9223	APHA, AWWA, WEF (2012)

Fonte: Própria Autora (2017).

#### 4.2.2 *Matérias-primas utilizadas*

O lodo oriundo do reator UASB foi descartado no leito de secagem de uma ETE localizada no município de Mata de São João, no dia 29/07/2016 e a coleta realizada no dia 17/08/2016. Essa ETE é operada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento – EMBASA e trata uma vazão média igual a 23,7 L/s. A Figura 05 mostra a coleta realizada pelos operários da EMBASA.

Figura 5 – Coleta do lodo anaeróbico no leito de secagem da ETE Iberostar.



Fonte: Própria autora (2017).

A serragem foi coletada em uma Madeireira, localizada no bairro do Imbuí na cidade de Salvador, Bahia e era composta de uma mistura de madeiras não tratadas.

O lodo e a serragem foram caracterizados individualmente quanto a pH, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), relação C/N, teor de umidade e sólidos totais voláteis. A Tabela 12 mostra as médias dos valores das análises realizadas em triplicata.

Tabela 12 – Caracterização do lodo e da serragem

Parâmetro	Lodo	Serragem
pH	8,7 ± 0,1	5,4 ± 0,2
Carbono (%)	17,8 ± 1,4	20,2 ± 0,8
Nitrogênio (%)	4,1 ± 0,1	0,4 ± 0,1
Relação C/N	4,3	54,7

(continua)

Tabela 12 – (Conclusão).

Parâmetro	Lodo	Serragem
Umidade (%)	84,1 ± 0,1	13,5 ± 0,5
STV (%)	64,6 ± 2,92	99,3 ± 0,1
Peso Específico (kg/m <sup>3</sup> )	879,4 ± 68,6	119,73 ± 9,0

Fonte: Própria Autora (2017).

Quanto às análises microbiológicas, o lodo foi caracterizado quanto a presença de coliformes totais e *E. Coli* no início do processo. A Tabela 13 mostra os resultados encontrados.

Tabela 13 – Concentração de coliformes totais e *E. coli* no lodo de esgoto

Parâmetro	Concentração (NMP/ g de ST)
Coliformes totais	1,57x10 <sup>7</sup>
<i>E. Coli</i>	2,63X10 <sup>4</sup>

Fonte: Própria Autora (2017).

#### 4.2.3 Local do experimento e montagem das pilhas

O local do experimento foi o galpão do LABEXAN 4 localizado na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia onde duas pilhas foram montadas no dia 23/08/2016. As pilhas foram montadas obedecendo a relação volumétrica de 1:1 (serragem e lodo) e a mistura foi realizada com o auxílio de baldes de 20 L, pás e enxadas. Todos os sacos contendo o lodo foram pesados, com auxílio de baldes plásticos de 20L e homogeneizados para coleta de amostra para caracterização inicial, como mostra a Figura 06.

Figura 6 – Lodo de esgoto sendo homogeneizado para coleta e divisão das pilhas.



Fonte: Própria autora (2017).



O total da massa de lodo foi de, aproximadamente, 430 kg e o peso específico foi 879,4 kg/m<sup>3</sup>. Assim, pela divisão em volume, cada pilha ficou com cerca de 245 L de lodo e o mesmo volume de serragem foi adicionado em cada pilha para obter uma relação volumétrica de 1:1. A Figura 07 mostra o processo de mistura da serragem ao lodo.

Figura 7 – Mistura da serragem com o lodo



Fonte: Própria Autora (2017).

Após a homogeneização da serragem com o lodo, foi realizada uma coleta para obter uma amostra de aproximadamente 450 gramas em cada pilha. Para isso, alíquotas foram retiradas aleatoriamente da massa antes de formar as pilhas. Por fim, as pilhas foram montadas conforme a Figura 08.

Figura 8 – Pilhas de compostagem de lodo.



Fonte: Própria Autora (2017).

As pilhas foram identificadas como LA e LB e a massa de resíduos foi caracterizada quanto ao valor de pH, carbono orgânico total, nitrogênio total Kjeldahl, umidade, sólidos voláteis, coliformes totais e *E. coli*.

### 4.3 Segunda fase: Adição do resíduo de alimentos como amendment agent

Nessa etapa foi adicionado ao processo de compostagem o resíduo de alimentos (78 quilos) que atuou como *amendment agent*. O resíduo foi oriundo da Central de Abastecimento de Salvador (CEASA) e coletado manualmente no chão dos galpões do estabelecimento.

Os resíduos foram triturados utilizando o triturador TR 200 da marca Trapp e caracterizados quanto a: umidade, sólidos voláteis, carbono orgânico total, nitrogênio total Kjeldahl, pH, peso específico, coliformes termotolerantes e *E. coli*.

O processo foi monitorado de forma semelhante à primeira fase quanto aos parâmetros físico-químicos e microbiológicos e o resultado é mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 – Caracterização do lodo e da serragem

Parâmetro	Lodo + Serragem	Resíduos de alimentos
pH	6,1 ± 0,2	4,9 ± 0,2
Carbono Orgânico Total (%)	19,7 ± 0,6	25,0 ± 1,8
Nitrogênio Total Kjeldahl (%)	3,4 ± 0,1	2,0 ± 0,1
Relação C/N	5,8	12,7
Umidade (%)	41,5 ± 0,9	90,4 ± 0,5
STV (%)	74,7 ± 0,6	89,8 ± 0,4
Peso Específico (kg/m <sup>3</sup> )	413,9 ± 25,6	1021,5 ± 52,2

Fonte: Própria Autora (2017).

Quanto às análises microbiológicas, a mistura do lodo com serragem da fase anterior e a mistura de os resíduos de alimentos triturados foram caracterizados quanto à presença de coliformes totais e *E. Coli* no início da segunda fase. A Tabela 15 mostra os resultados encontrados

Tabela 15 – Concentração de coliformes totais e *E. coli* na Fase 2.

Parâmetro	Concentração (NMP / g de ST)	
	Resíduos de alimentos	Lodo + Serragem
Coliformes totais	>1,1x10 <sup>9</sup>	9,8x10 <sup>5</sup>
<i>E.coli</i>	3,9x10 <sup>5</sup>	3,4x10

Fonte: Própria Autora (2017).

### 4.3.1 *Composto final*

Ao fim da segunda fase, o composto final passou por peneira com malha de 0,5 cm e foram medidos o volume e o peso final do material retido e peneirado da pilha. Além disso, o composto peneirado foi levado para análise, em triplicata, na Eco System Preservação do Meio Ambiente LTDA localizado na cidade de São Paulo.

Os parâmetros físico-químicos analisados foram: carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, arsênio, boro, cádmio, cálcio, cálcio total, capacidade de retenção de água, chumbo, cloro, cobalto, cobre, cromo, densidade, enxofre, enxofre total, ferro, fosfato total, magnésio, magnésio total, manganês, matéria orgânica total, matéria orgânica compostável, matéria orgânica residual, mercúrio, molibdênio, níquel, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio nitrato/nitrato, nitrogênio total, óxido de potássio, pH, potássio total, resíduos minerais, resíduos minerais solúveis, silício, sódio total, umidade e zinco.

Quanto aos parâmetros microbiológicos apenas coliformes termotolerantes e ovos de helmintos foram analisados.

## 4.4 **Análise econômico-financeira**

A fim de avaliar a possibilidade de implantação da compostagem, foi realizado um estudo de geração de lodo de UASB de uma ETE de pequeno porte, com população estimada de 1.100 habitantes (descrita no item 4.4.1) e verificaram-se os custos envolvidos na destinação do lodo gerado com a adoção da compostagem no local.

Sendo assim, foi utilizada, como ferramenta de avaliação de investimento, a técnica de Valor Presente Líquido (VPL) na qual foram incluídos os custos de instalação e operação do sistema ao longo da vida útil da ETE e as receitas que foram os custos envolvidos com a destinação em aterro sanitário. A taxa de juros utilizada foi a Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC) e o horizonte de projeto de 20 anos. A Equação 1 representa o cálculo utilizado para verificar o VPL do projeto.

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1 + i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1 + i)^{-j} \quad (\text{Equação 1})$$

em que,

$R_j$  = valor atual das receitas;

$C_j$  = valor atual dos custos;

$i$  = taxa de juros;

$j$  = períodos que as receitas ou os custos ocorrem; e

$n$  = duração do projeto,

O princípio da técnica utilizada determina que o projeto será economicamente viável se apresentar VPL positivo. Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade do VPL conforme a metodologia proposta por Rego (2016) a fim de verificar as mudanças do VPL com o crescimento das receitas e despesas. Toda essa análise foi realizada com o auxílio do software Microsoft Office Excel 2007.

#### **4.4.1 ETE utilizada para estudo de viabilidade econômica**

A ETE está localizada no município de Lauro de Freitas - Bahia e atende um condomínio que possui 220 unidades residenciais com população estimada de 1.100 habitantes e que ocupa uma área 110m<sup>2</sup> (EMBASA, 2010). Atualmente, a ETE não possui uma etapa de desaguamento que é fundamental para o processo de compostagem ou mesmo para a destinação para aterro sanitário e, por isso, não foram estimados os custos dessa etapa visto que é um processo inerente às duas destinações avaliadas. A Figura 09 mostra o local onde a ETE está instalada.

Figura 9 – Estação de Tratamento de Esgotos Especial.



Fonte: Própria Autora (2017).

#### 4.4.2 Cálculo da produção de lodo descartado gerado

Para estimar a produção de lodo de descarte foram utilizados os dados da Tabela 16.

Tabela 16 – Dados utilizados para o cálculo da produção de lodo mensal

Item	Dados	Referência	Cálculo	Valor	Unidade
A	População	EMBASA (2010)	n.a.	1100	hab
B	Consumo de água per capita	EMBASA (2016)	n.a.	150	L/hab.d
C	Consumo de água	n.a.	(A*B)/1000	165	m <sup>3</sup> /d
D	Contribuição de esgotos	EMBASA (2016)	0,8*C	132	m <sup>3</sup> /d
E	Carga orgânica per capita	Von Sperling (2005)	n.a.	54	gDBO <sub>5,20</sub> /hab.d
F	Carga orgânica DBO total	n.a.	(A*E)/1000	59,4	kgDBO/d
G	Concentração DBO afluente	n.a.	(F/D)*1000	450	mg/L
H	Carga orgânica DQO total	Metcalf e Eddy Inc. (2003)	2,0*F	118,8	kgDQO/d
I	Concentração DQO Afluente	n.a.	(H/D)*1000	900	mg/L
J	Coefficiente de produção de sólidos	Chernicharo (2007)	n.a.	0,15	kgSST/kgDQO
L	Teor de sólidos do lodo descartado	Chernicharo (2007)	n.a.	4	%
M	Densidade do lodo descartado	Chernicharo (2007)	n.a.	1020	kg/m <sup>3</sup>
N	Produção de lodo estimada	n.a.	H*J	17,8	kgSST/d
O	Produção de lodo volátil estimada	Piveli (2016)	0,7*O	16,04	kgSSV/d
P	Porcentagem de digestão	Piveli (2016)	n.a.	55	%
Q	Produção de lodo volátil digerido	Piveli (2016)	O*P	8,82	kgSSV/d
R	Produção total de lodo que vai para secagem	Piveli (2016)	N-Q	9,00	kgSST/d
S	Volume diário de lodo que vai para secagem	Piveli (2016)	R/[(L/100)*M]	0,22	m <sup>3</sup>
T	Teor de sólidos do lodo pós secagem	n.a.	n.a.	30	%
U	Densidade do lodo pós secagem	Chernicharo (2007)	n.a.	900	kg/m <sup>3</sup>
V	Volume diário de lodo seco	n.a.	R/[(T/100)*U]	0,033	m <sup>3</sup>
X	Volume mensal de lodo seco	n.a.	V*30	1,00	m <sup>3</sup>

**Legenda:** n.a. (não se aplica).

Fonte: Própria Autora (2017)

Assim, observou-se que, para essa ETE, a produção de lodo desidratado é de, aproximadamente, 1,0 m<sup>3</sup> por mês, com teor de sólido próximo a 30%. Sendo assim,

foi avaliada a viabilidade econômica-financeira da implantação da compostagem de lodo na estação como alternativa à disposição em aterro sanitário.

Quanto a área necessária, o cálculo considerou que o processo durará 4 (quatro) meses, e que o resíduo estruturante é a serragem em proporção volumétrica de 1:1 para atingir umidade próxima ao teor ótimo de 60%.

Apesar da adição da serragem, notou-se, na montagem dos experimentos, que esse material não agrega muito volume pela sua capacidade de absorção e, também, pela pequena granulometria do lodo que agrega facilmente ao resíduo. Dessa forma, para efeito de cálculo, foram adicionados 30% do volume de lodo para estimar a área total necessária ao processo. A Tabela 17 mostra os resultados do dimensionamento da área requerida para implantação da compostagem.

Tabela 17 – Cálculo da demanda de área do galpão para realização da compostagem.

Item	Valor	Unidade
Quantidade de pilhas	4	unid.
Volume da pilha	1,3	m <sup>3</sup>
Altura da pilha	1	m
Raio da pilha	1,1	m
Área da base da pilha	3,9	m <sup>2</sup>
Área de folga para revolvimento da pilha	3,9	m <sup>2</sup>
Área total para 4 pilhas	31,2	m <sup>2</sup>

Fonte: Própria Autora (2017).

Considerando dados da EMBASA (2010), que realizou a implantação da ETE compacta em estudo, a área de implantação foi de 110m<sup>2</sup>. Assim, com a implantação da área para compostagem será necessário um acréscimo de 29 % o que significa uma demanda de área de 0,031 m<sup>2</sup>/hab.

#### 4.4.3 Investimento, receita e custos

Para a análise do VPL foi preciso definir o fluxo de caixa no horizonte do projeto (20 anos). Para isso, a Tabela 18 resume os dados utilizados quanto a investimento, receita e custos para implantação da compostagem como destinação do lodo da ETE.

Tabela 18 – Resumo dos valores de investimento, receita e custos

Investimento (R\$)		Receita (R\$)		Custo (R\$)	
Galpão	11.990,09	Transporte para o aterro	400,00	Análises laboratoriais	A depender do cenário
Triturador	1.422,92	Disposição em aterro	493,00	Mão-de-obra	7.687,68
Peneiras	35,32				
Termômetros	430,00				
<b>Total anual</b>	<b>13.878,33</b>	<b>Total anual</b>	<b>10.716,00</b>	<b>Total anual</b>	<b>A depender do cenário</b>

Fonte: Própria Autora (2017).

Para os gastos com investimento, considerou-se a construção de um galpão de 35 m<sup>2</sup>, um triturador para resíduos orgânicos, peneiras e dois termômetros analógicos. O valor do galpão foi estimado a partir de um orçamento expedido no mês de fevereiro do ano de 2013 da construção do galpão do LABEXSAN 4 onde o experimento foi montado e os valores corrigidos para o mês de setembro do ano de 2016 pelo índice de correção monetária (IPCA), o que correspondeu a um acréscimo de 30,96% do valor. O preço do triturador, peneiras e termômetros foram obtidos por orçamento específicos.

O valor cobrado para destinação do lodo ao aterro foi considerado como receita já que esse valor será economizado. Apesar de o lodo ter como característica a patogenicidade, ele é classificado como resíduo Classe II-A pela NBR 10.004/2004, pois a norma traz uma exceção para resíduos de tratamento de esgotos domésticos.

Sendo assim, atualmente, o aterro que aceita esse resíduo na região metropolitana de Salvador é o CITA-Bahia operado pela Hera Ambiental Ltda. e localizado no município de São Francisco de Conde, Bahia. O orçamento realizado no mês de julho do ano de 2016 forneceu o valor de R\$233,00 por tonelada para disposição no aterro, e uma taxa de R\$260,00 hora/descarte. Além disso, considerando que o aterro fica localizado a 50km da ETE, o orçamento realizado estimou o custo de R\$400,00 para o transporte de 1m<sup>3</sup> do resíduo, que é a produção de lodo mensal calculada para ETE em estudo.

Dentre os fatores que promovem receita, não foi considerada a comercialização do composto final visto que ainda não é uma prática comum no país, o que torna difícil a atribuição de um valor monetário. Porém, com auxílio da função Atingir Meta do software Microsoft Excel, foi possível estimar o valor necessário do produto para garantir um VPL positivo.

Quanto aos custos, a mão de obra foi estimada conforme uma necessidade horária de 16 horas semanais, considerando como trabalho a ser realizado o revolvimento, a medição de temperatura e o peneiramento ao final, foi adotada a taxa de R\$ 9,24 servente/hora, encontrada no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e, para avaliar as mudanças no VPL, foram propostos 4 (quatro) cenários observando que os valores para investimento e receita são iguais para qualquer cenário adotado, o que variam são os custos e, mais especificamente, o preço das análises laboratoriais necessárias para o monitoramento anual definido pela Resolução CONAMA 375/2006. A Tabela 19 mostra os cenários propostos para análise do VPL.

Tabela 19 – Cenários de análise do VPL.

Cenário	Análises propostas
1	Substâncias orgânicas, substâncias inorgânicas, potencial agrônômico e sanidade
2	Substâncias inorgânicas, potencial agrônômico e sanidade
3	Potencial agrônômico e sanidade
4	Apenas Sanidade

Fonte: Própria Autora (2017).

Para os custos de análises laboratoriais foram utilizadas cotações realizadas por Bittencourt (2014) utilizando o IPCA como índice de correção monetária do período de janeiro/2014 a setembro/2016 que foi de 24,82%. A Tabela 20 mostra os custos das análises sem a correção.

Tabela 20 - Custo de análises laboratoriais para caracterização de um lote de lodo de esgoto de acordo com a Resolução CONAMA 375/06 no Brasil.

Lab.	Custo Análise (R\$)			Sanidade		Total	
	Potencial agrônômico	Substâncias Inorgânicas	Substâncias orgânicas	Classe		Classe	
				A	B	A	B
A	370,00	280,00	750,00	1.150,00	-	2.550,00	-
B	550,00	430,00	810,00	1.450,00	-	3.240,00	-
C	772,65	260,91	4.061,70	886,98	-	5.982,24	-
D	382,00	286,00	2.940,00	655,00	235,00	4.263,00	3.843,00

Fonte: Bittencourt (2014).

Basicamente, o que muda para a classificação do produto final são os parâmetros de sanidade. Para o produto ser classificado como classe A, a Resolução CONAMA 375/2006 exige a análise de: coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *salmonella* e vírus em frequência definida pela quantidade gerada. Para o produto



ser considerado classe B, apenas, as análises de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos são exigidas.

Como no trabalho de Bittencourt (2014) o laboratório D foi o único em que foram discriminados os valores das análises de sanidade foi adotado, para análise de VPL, os valores do laboratório D para todos os laboratórios a fim de obter a média de preço das análises em cada cenário proposto. A Tabela 21 mostra os valores das médias dos custos das análises laboratoriais para cada cenário e, além disso, foram calculados os valores considerando a frequência de coleta de uma amostra por ano, e, também, quatro amostras por ano que é o critério preconizado pela Resolução CONAMA 375/2006 no Anexo IV.

Tabela 21 – Custos médios de análises laboratoriais por cenário.

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	4.528,78	18.115,14	4.004,55	16.018,20
2	1.857,15	7.428,61	1.332,92	5.331,67
3	1.464,94	5.859,76	940,71	3.762,82
4	817,56	7.687,68	293,32	1.173,29

Fonte: Própria Autora (2017).

A Tabela 22 mostra o resumo dos dados utilizados para análise do VPL.

Tabela 22 – Resumo dos dados utilizados na análise de VPL

Variável	Valor
Investimento Inicial	R\$ 13.878,33
Receita	R\$ 10.716,00
Custos	A depender do cenário
Taxa de juros	14,15%
Duração do projeto	20 anos

Fonte: Própria Autora (2017).

Assim, para cada cenário proposto foi realizado o cálculo do VPL e optou-se, também, por realizar o cálculo para cada cenário considerando as diferenças de custos envolvidos na análise de sanidade para a classificação (classe A ou B) do produto gerado conforme a Resolução CONAMA 375/2006 apesar de, no artigo 11, não permitir a aplicação do produto Classe B após cinco anos da publicação dessa Resolução.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Monitoramento do processo

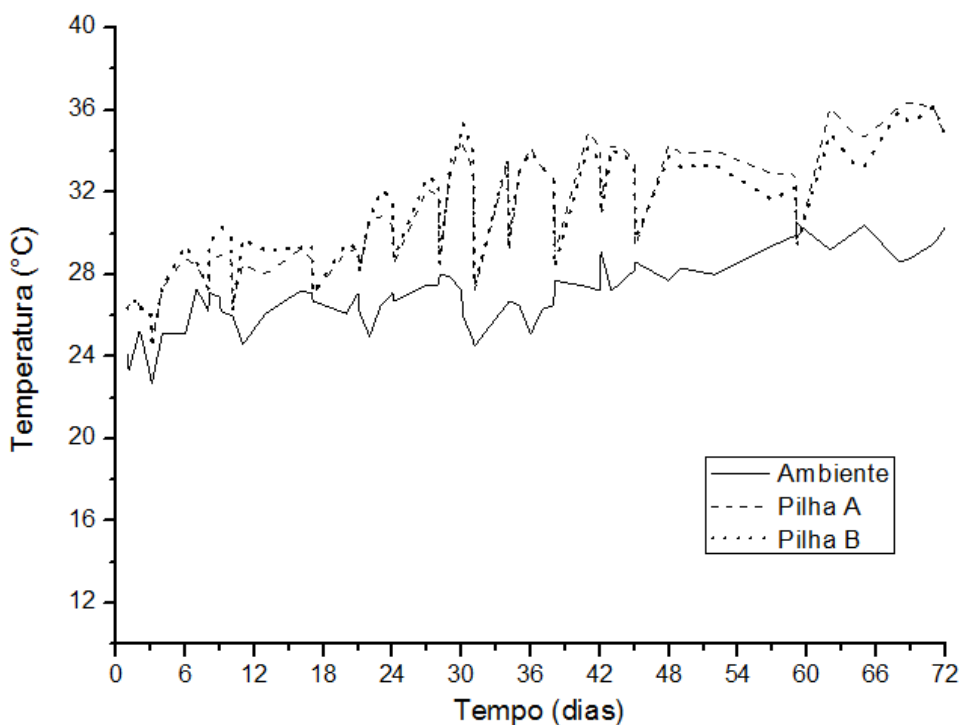
Nesse tópico serão mostrados os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas das duas fases do processo de compostagem, a caracterização do composto final e, por fim, elucidar algumas questões sobre o aspecto operacional do experimento.

#### 5.1.1 Primeira Fase: Lodo + Serragem

##### 5.1.1.1 Parâmetros físico-químicos

Nessa primeira fase, utilizando a serragem como agente estruturante (*bulking agent*) e sem qualquer agente aditivo (*amendment agent*), os perfis de temperatura apresentados nas duas pilhas (LA e LB) são mostrados na Figura 10.

Figura 10- Perfil de temperatura das pilhas de compostagem (A e B) da primeira fase.



Fonte: Própria autora (2017).

El Fels *et al.*(2014) afirmam que a variação da temperatura durante a compostagem é o primeiro indício de sucesso do processo. Isso é resultado de transformações

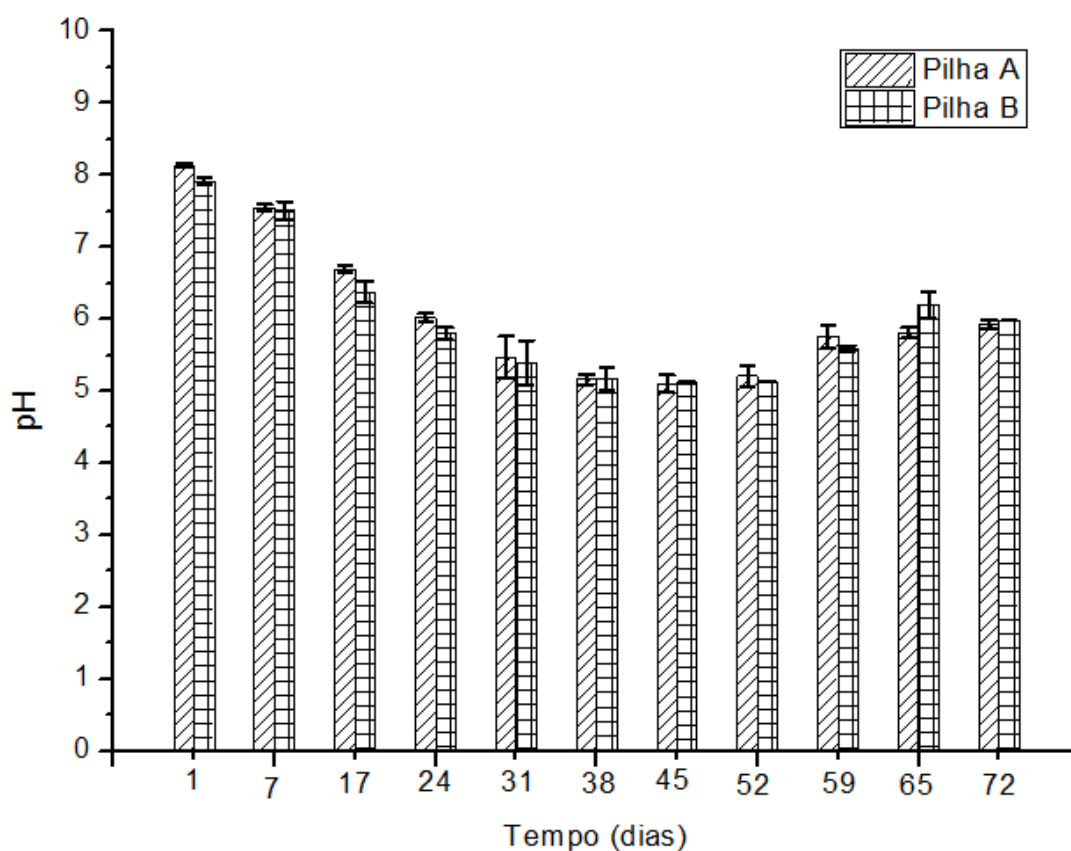
bioquímicas indicando o caráter de reações exotérmicas do processo (Sidelko *et al.*, 2010).

Apesar de diversos estudos (Arias *et al.*, 2012; Cukjati *et al.*, 2012; Fountoulakis *et al.*, 2010; Nikaeen *et al.*, 2015) terem obtido sucesso no alcance da fase termófila, ou seja, temperatura acima de 55°C (Cukjati *et al.*, 2012; Kulikowska e Gusiatin, 2015), utilizando lodo anaeróbio misturado com resíduos de degradação lenta tais como lascas ou aparas de madeira e resíduos verdes, as pilhas A e B não alcançaram a fase termófila e o pico de temperatura encontrado foi próximo de 36 °C, resultado similar ao encontrado por Ingelmo *et al.* (2012) que atribuíram a ocorrência dessa temperatura ao fato da serragem não ser facilmente degradável.

Nota-se que, nessa primeira fase, pelo fato das pilhas além de não terem atingido a fase termófila e, considerando os critérios do Anexo I da Resolução CONAMA 375/2006, também não foi possível obter êxito nos processos de redução de patógenos e redução da atratividade de vetores, visto que são critérios exigidos no Art. 3º e, para o processo de compostagem, esses critérios associam temperatura e tempo de exposição para definir a classificação do produto derivado de lodo de esgoto.

Quanto ao valor do pH, segundo Fernandes *et al.*(1999), é comum no início do processo a redução desse valor, visto que há produção de ácidos orgânicos. Entretanto, essa redução foi mais lenta do que o habitual, pois, normalmente, esse comportamento é observado nos primeiros dias do processo. Os autores ainda salientam que há diminuição da atividade microbiológica em valores de pH próximos ou inferiores a 5,0. A Figura 11 mostra o valor de pH durante o processo nas duas pilhas, onde é possível notar a redução do valor do pH em ambas as pilhas.

Figura 11 – Valor do pH das pilhas LA e LB ao longo da primeira fase.

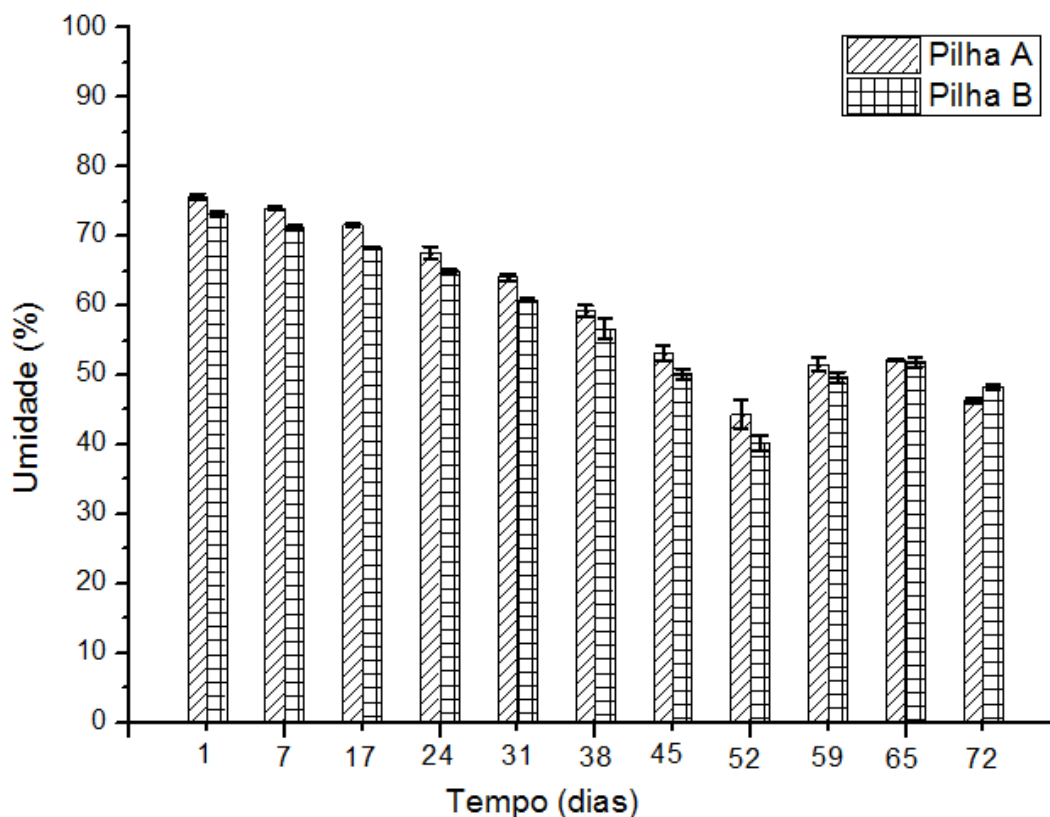


Fonte: Própria autora (2017).

Diaz e Savage (2007) também afirmam que é esperado uma queda do pH no início do processo como uma consequência da atividade de bactérias acidogênicas que quebram materiais carbonáceos complexos em ácidos orgânicos como produtos intermediários. Os autores salientam que, quando essa fase termina o pH tende a aumentar e ao final do processo é de cerca de 8,0 – 8,5 o que não ocorreu nessa fase do experimento onde o pH caiu para valores próximos de 5,0 e ao fim da fase os valores ficaram próximos de 6,0 em ambas as pilhas.

No que se refere à umidade, a Figura 12 apresenta o comportamento desse parâmetro ao longo da primeira fase.

Figura 12 – Teor de umidade ao longo da primeira fase nas pilhas LA e LB.



Fonte: Própria autora (2017).

Diaz e Savage (2007) salientam que um excesso de umidade no início da compostagem pode favorecer processos anaeróbios, resultando em um processo mais lento e um produto final de baixa qualidade. É possível notar que a umidade inicial, próxima de 75% em ambas as pilhas, estava acima do considerado teor ótimo recomendado na literatura: entre 50% e 60% (Fernandes *et al.*, 1999).

Optou-se por esperar as pilhas atingirem o teor ótimo, com o auxílio de revolvimentos periódicos que, segundo Nikaeen *et al.*, (2015), permitem uma rápida diminuição do teor de água nas pilhas devido à troca de calor com o ambiente e também devido as condições climáticas locais que favoreceram o decréscimo da umidade, visto que o excesso de água obstrui os poros o que dificulta a oxigenação da massa de compostagem (de Bertoldiet *al.*, 1983).

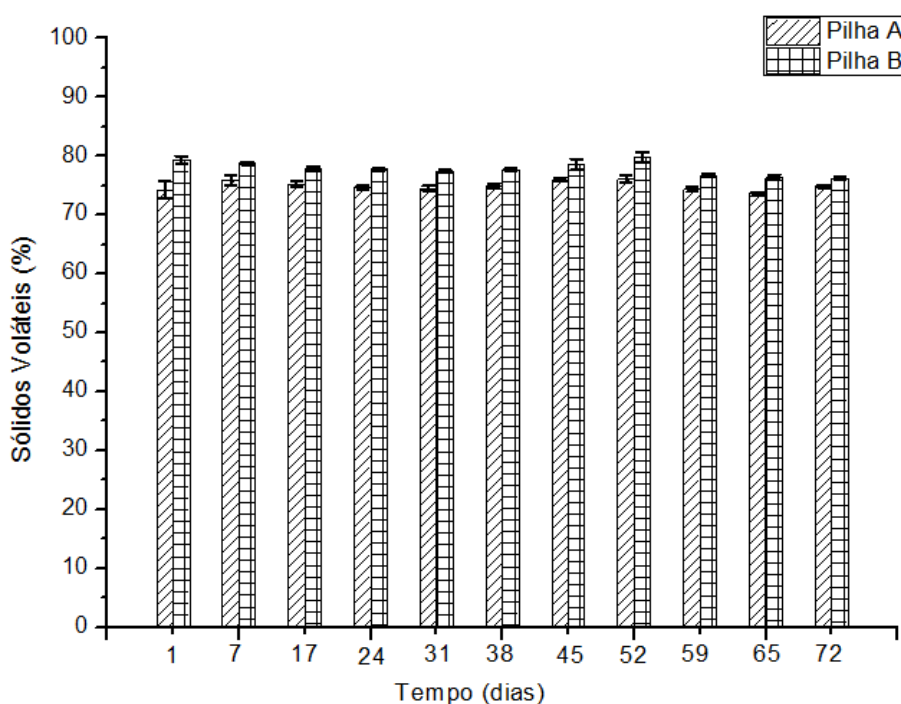
A questão do alto teor de umidade foi a primeira hipótese para que a temperatura não se elevasse e a massa de compostagem chegasse à fase termófila, porém, mesmo após atingir o teor ótimo de umidade, as duas pilhas mantiveram

temperaturas próximas à temperatura ambiente descartando a hipótese da influência do teor de água e o alcance da temperatura.

Como o baixo nível de água reduz a intensidade da atividade microbológica (Rihani *et al.*, 2010), houve reposição de água nos dias 59 e 65 a fim de manter as pilhas com teor de umidade acima de 50%. A reposição de água foi realizada durante o revolvimento para que fosse possível homogeneizar o teor de umidade em toda a pilha.

Quanto a decomposição da matéria orgânica, Lu *et al.* (2008) consideram que pode ser determinada através da análise de sólidos voláteis. É esperado que haja uma intensa degradação da matéria orgânica durante o processo de compostagem, principalmente na fase inicial, quando ocorre a fase termófila e há intensa atividade microbológica (Lashermes *et al.*, 2012; Kulikowksa e Klimiuk, 2011). A Figura 13 mostra o comportamento dos sólidos voláteis ao longo da primeira fase.

Figura 13 – Percentual de Sólidos Totais Voláteis nas pilhas LA e LB ao longo da primeira fase.



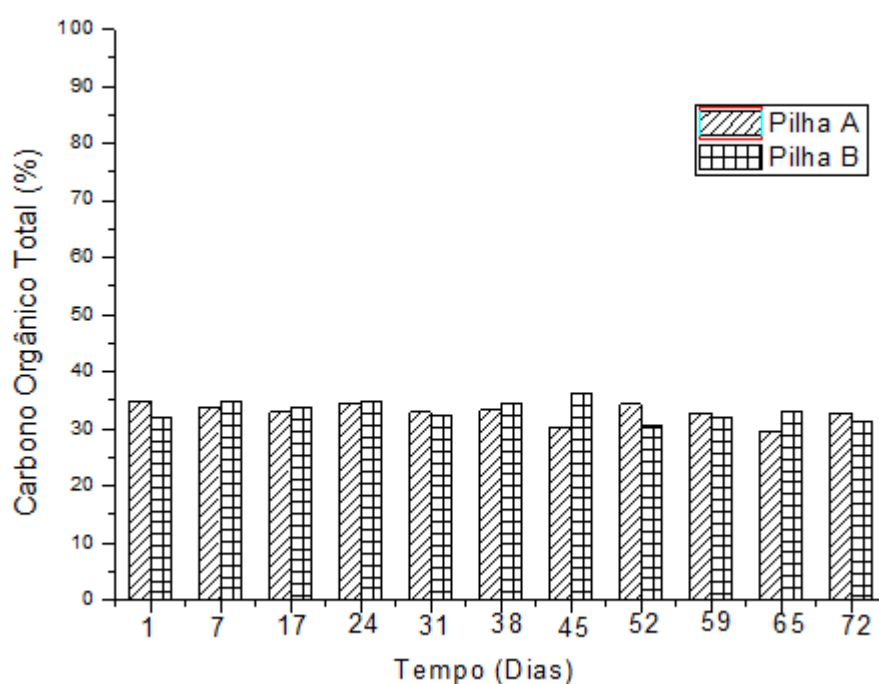
Fonte: Própria autora (2017).

Como nessa primeira fase não houve acréscimo significativo na temperatura, ou seja, as pilhas não atingiram a fase termófila, não foi observada variação significativa dos sólidos totais voláteis, como pode ser visto na Figura 13, o que

confirma que não houve atividade microbiológica intensa. Esse fato pode estar relacionado com a dificuldade de degradação da serragem que é um material lignocelulósico, pois Rihani *et al.* (2010) relatam que materiais ricos em celulose e lignina são menos suscetíveis à atividade microbiana.

Outra forma de avaliar a degradação da matéria orgânica é através da análise do Carbono Orgânico Total (COT) e a Figura 14 mostra o comportamento desse parâmetro nas pilhas A e B.

Figura 14 – Evolução do Carbono Orgânico Total na primeira fase.



Fonte: Própria autora (2017).

Ingelmo *et al.* (2012) afirmam que é esperado que o conteúdo do COT diminua significativamente durante a compostagem devido a decomposição da matéria orgânica através da respiração microbiana com liberação de  $\text{CO}_2$  e até mesmo por mineralização e seus resultados mostraram que apesar de também não terem alcançado a fase termófila, houve diminuição significativa do teor de carbono orgânico total.

No início do processo, a média do teor de COT era de 34,81% na pilha A e 32,04% na pilha B e, ao fim dessa fase, o teor de COT na pilha A e B foi de, respectivamente, 32,67% e 31,32%, o que significa uma redução de apenas 6,15%

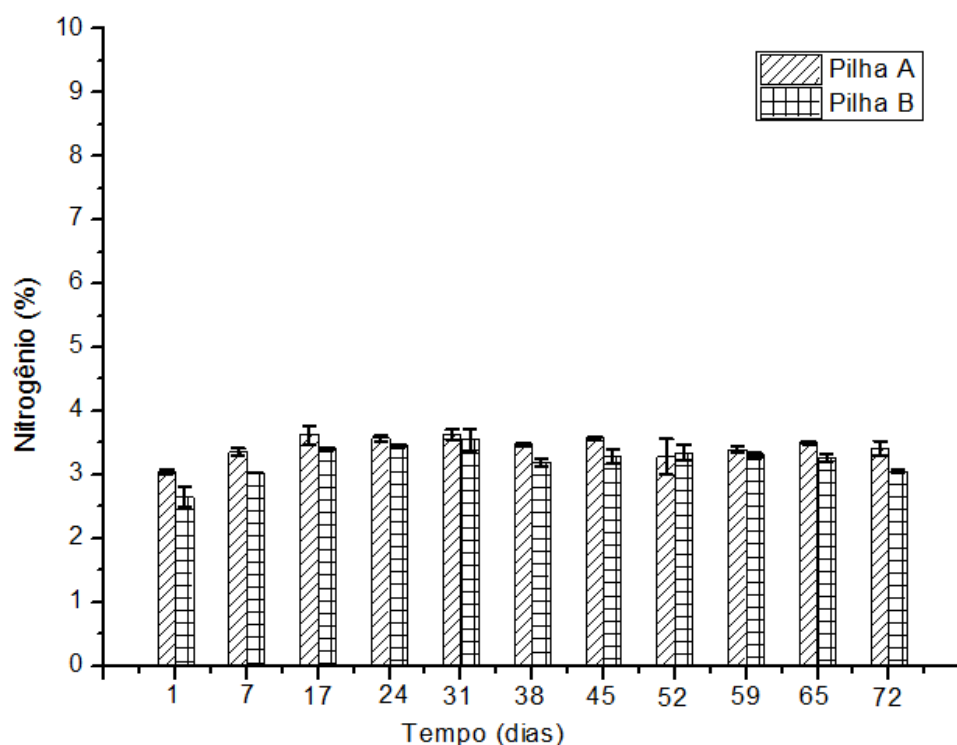


na pilha A e de 2,25 % na pilha B, indicando que houve pouquíssima degradação da material carbonáceo das pilhas nessa primeira fase.

El Fels *et al.* (2014) também observaram diminuição no teor de COT, porém, vale ressaltar, que os autores associaram essa queda à fase termófila, devido à oxidação contínua de compostos orgânicos que resulta na diminuição de compostos facilmente degradáveis.

Em relação ao Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), a Figura 15 mostra o comportamento desse parâmetro nas duas pilhas durante a primeira fase.

Figura 15 - Evolução do teor de Nitrogênio Total Kjeldahl na primeira fase.



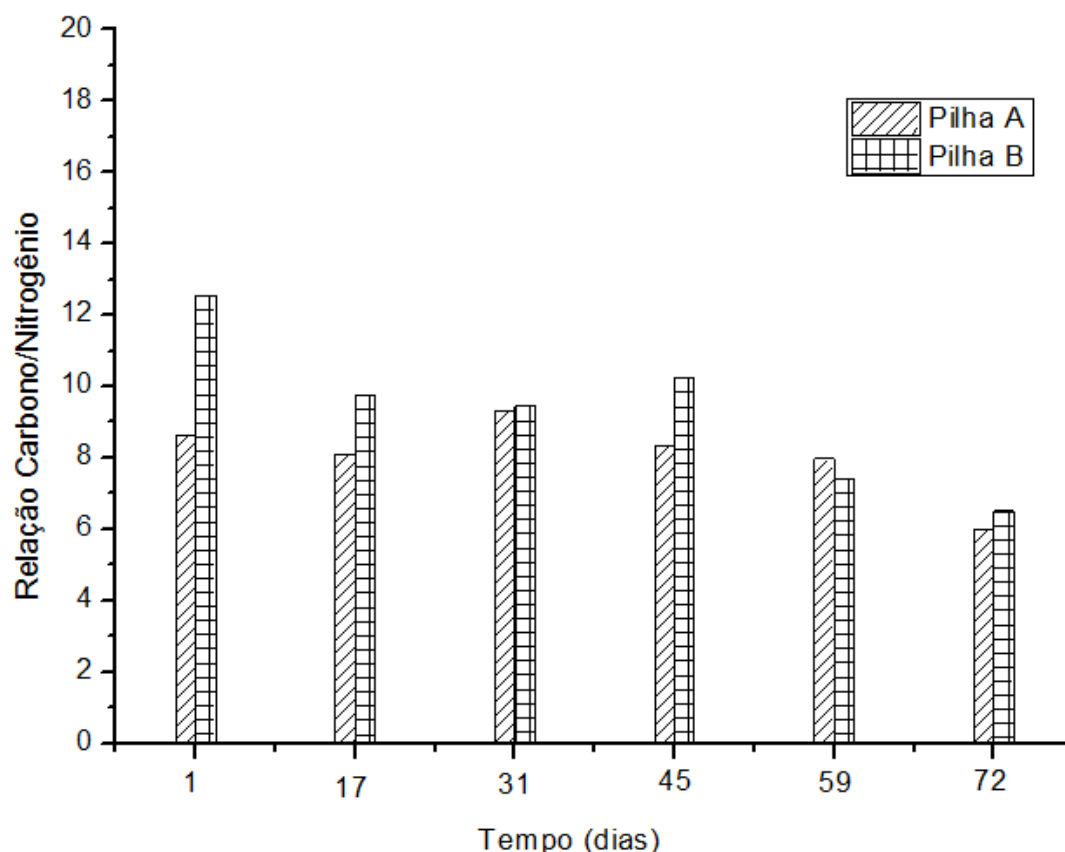
Fonte: Própria autora (2017).

No início do processo, a média do teor de NTK era de  $3,0 \pm 0,0$  % na pilha A e  $2,7 \pm 0,2$  na pilha B. Essa diferença entre as pilhas também pode ser explicada pela dificuldade de homogeneização no início do processo. Ao término dessa fase, o teor de NTK na pilha A e B foi de, respectivamente,  $3,4 \pm 0,1$  e  $3,0 \pm 0,0$ . Rihani *et al.*(2010) também relataram um incremento no teor de nitrogênio e, segundo El Fels *et al.* (2014), esse aumento está relacionado à degradação dos compostos

carbonáceos, o que confirma que houve certa degradação nessa fase ainda que a temperatura não tenha alcançado valores altos.

Quanto à relação C/N, a Figura 16 mostra a evolução desse parâmetro ao longo da primeira fase.

Figura 16 – Evolução da relação C/N durante a primeira fase.



Fonte: Própria autora (2017).

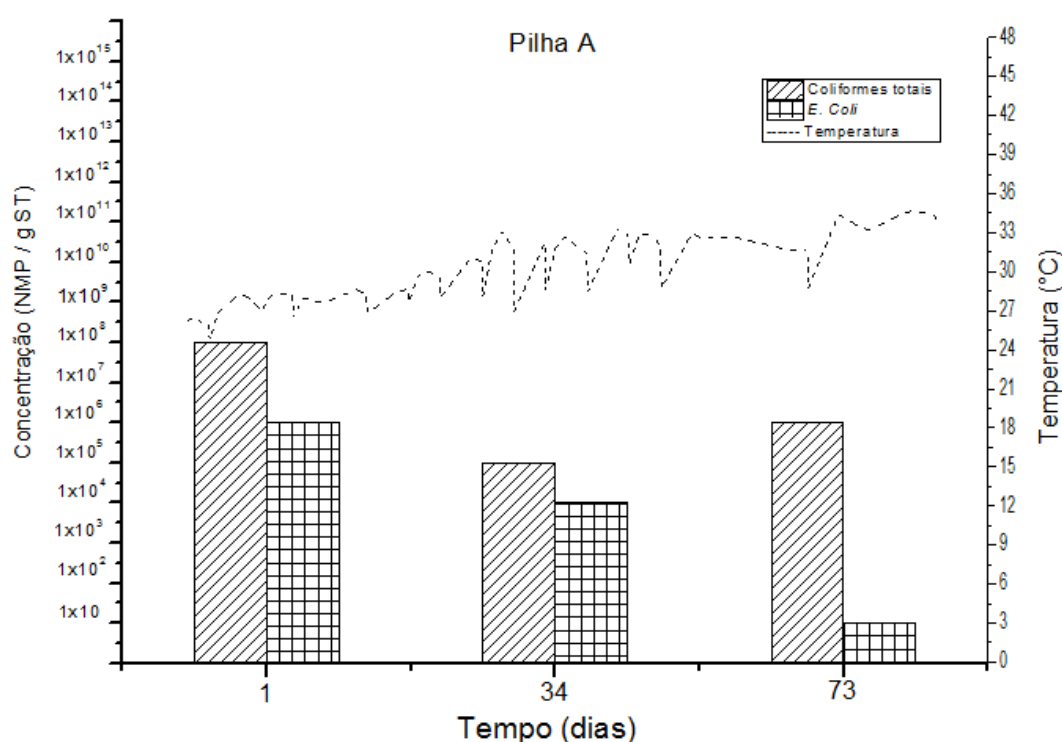
Nota-se que a relação C/N inicial ficou abaixo do considerado ideal (20 a 30) em ambas as pilhas com valores de 11,4 e 12,1 nas pilhas A e B, respectivamente. Diversos trabalhos como os de Rodriguez *et al.* (2012), Cukjati *et al.* (2012) e Kulikowska e Gusiani (2015) iniciaram o processo com a relação C/N abaixo dessa faixa e mesmo assim conseguiram atingir a fase termófila em poucos dias. Fernandes *et al.* (1999) salientam que uma relação C/N baixa pode facilitar a perda de nitrogênio pela volatilização da amônia, porém as análises de NTK realizadas ao longo dessa fase não mostraram essa perda. Observa-se também que a relação C/N decresceu devido tanto à diminuição do teor de COT quando pelo aumento da

concentração de NTK finalizando essa fase com valores de 9,6 e 10,3 nas pilhas A e B, nessa ordem.

### 5.1.1.2 Parâmetros microbiológicos

A Figura 17 mostra a evolução da concentração de coliformes totais e de *E. coli* na pilha A.

Figura 17 – Evolução da concentração de coliformes totais e *E. coli* na pilha A.

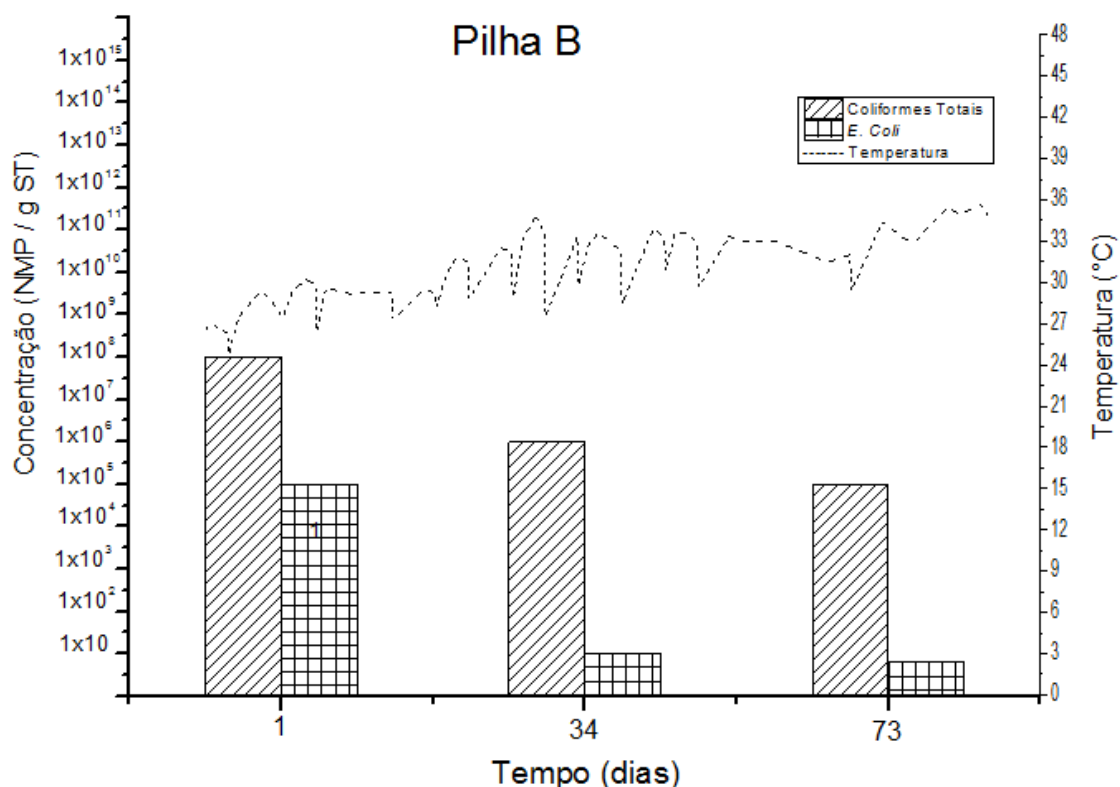


Fonte: Própria autora (2017).

Apesar de nessa fase as pilhas não terem alcançado a fase termófila, observa-se que houve decaimento tanto da concentração de coliformes totais quanto de *E. coli*, que inicialmente estava em, respectivamente,  $1,6 \times 10^8$  e  $9,1 \times 10^5$  NMP/g de ST e, ao final de 73 dias, decaíram para  $1,7 \times 10^6$  e  $3,7 \times 10$  NMP/g de ST, nessa ordem.

A Figura 18 mostra o comportamento da concentração de coliformes totais e *E. coli* na pilha B.

Figura 18 – Evolução da concentração de coliformes totais e *E. coli* na pilha B.



Fonte: Própria autora (2017).

De forma semelhante à pilha A, na pilha B esses micro-organismos decaíram ao longo do tempo, mas foram detectados até o fim do processo. No início a concentração de coliformes totais era de  $2,8 \times 10^8$  NMP/g de ST passando para  $1,3 \times 10^5$  NMP/g de ST ao término dessa fase e a concentração de *E. coli*, que no início era de  $3,4 \times 10^5$  NMP/g de ST, ao fim do processo estava em  $1,9 \times 10$  NMP/g de ST.

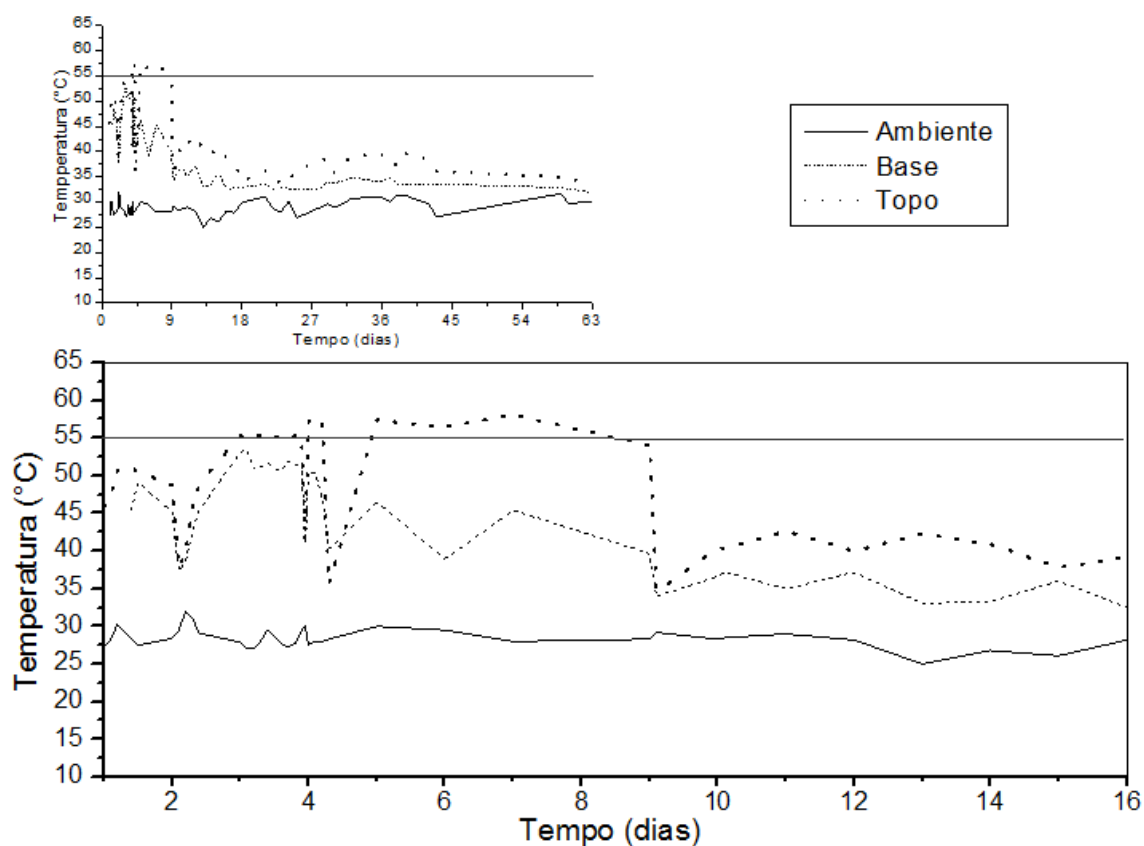
Quando se compara o valor detectado para *E. coli* ao limite de coliformes termotolerantes exigido na Resolução 375/2006, nota-se que, apesar de não ter alcançado a fase termófila, a concentração encontrada permitiria, considerando apenas esse parâmetro, que o composto fosse classificado como Classe A, visto que o limite é de  $< 10^3$  NMP / g de ST.

## 5.1.2 Segunda Fase: Lodo + Serragem + Resíduos de Alimentos

### 5.1.2.1 Parâmetros físico-químicos

Após a junção das duas pilhas da fase anterior (A e B) e a adição de resíduos de alimentos triturados como *amendment agent*, o perfil de temperatura da pilha resultante (C) é mostrado na Figura 19, com destaque na fase termófila.

Figura 19 – Perfil de temperatura da pilha de compostagem (C) da segunda fase.



Fonte: Própria autora (2017).

Com a adição dos resíduos de alimentos observa-se que o incremento na temperatura, diferentemente da primeira fase, ocorreu logo no início do processo. Esse fato tem relação com o que é preconizado Haug (1993) *apud* Lashermes *et al.* (2012) sobre a influência da mistura inicial no aumento da temperatura por meio do balanço de nutrientes e das suas frações de orgânicas facilmente biodegradáveis.

Como pode ser visto na Figura 09, o processo atingiu a fase termófila com pico de temperatura de 58°C no topo da pilha, porém a temperatura da base da pilha não ultrapassou os 53 °C. Era esperado que a temperatura da pilha não fosse

homogênea, visto que Insam e de Bertoldi (2007) afirmam que no topo há um bom fornecimento de oxigênio e é o ponto de conversão de calor. Esses autores ainda salientam a importância de, por meio do revolvimento regular, garantir que diversas partes da pilha tenham acesso ao topo possibilitando assim o contato com temperaturas mais elevadas.

Desse modo, durante a fase termófila, o revolvimento da pilha foi praticamente diário a fim de permitir o contato de várias parcelas da pilha às temperaturas altas, além de permitir um maior fornecimento de oxigênio. É possível observar ainda na Figura 12 que há quedas bruscas de temperaturas quando há o revolvimento e a massa de compostagem resfria, mas, constata-se também que rapidamente a temperatura é recuperada, mesmo para o volume utilizado (0,5 m<sup>3</sup>).

Segundo o Art. 3º da Resolução CONAMA 375/2006, para o uso agrícola, o lodo deve passar por processo de redução significativa de patógenos e de atratividade de vetores, que são critérios relativos a temperatura atingida e o tempo de exposição no processo de compostagem. A Tabela 23 mostra os critérios que devem ser respeitados na compostagem para cada processo

Tabela 23 – Critérios de tempo-temperatura da Resolução CONAMA 375/2006 para o processo de compostagem de lodo.

<b>Redução Significativa de Patógenos (Classe B)</b>	<b>Redução Adicional de Patógenos (Classe A)</b>	<b>Redução da Atratividade de Vetores</b>
A biomassa tem que atingir uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período.	Compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo).	A temperatura da biomassa deve ser mantida acima de 40° C por pelo menos 14 dias. A temperatura média durante este período deve ser maior que 45°C.

Fonte: Brasil (2006).

Sendo assim, considerando os critérios da legislação para o processo de redução significativa de patógenos, durante cinco dias a temperatura do topo da pilha esteve acima dos 55°C e por quatorze dias acima 40°C podendo-se então afirmar, visto que não é estabelecida na legislação onde deve ser medida a temperatura na pilha, que o experimento realizado obteve sucesso e obteve a redução significativa de patógenos. Vale salientar, que a pilha manteve a temperatura mesmo após os revolvimentos que, nos primeiros momentos, esfriam a pilha, mas que também garantiam o fornecimento de oxigênio para o processo. Da mesma forma, a pilha

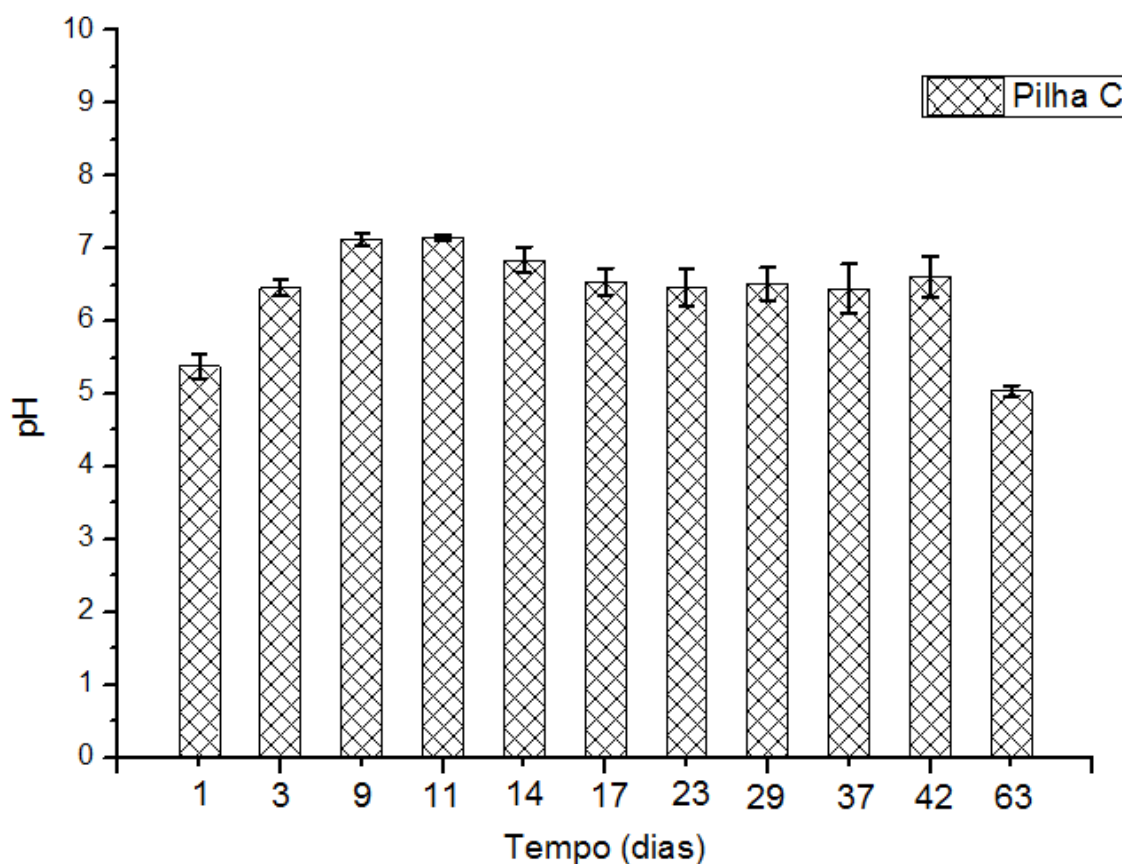
também conseguiu alcançar os critérios quanto ao processo de redução de atratividade de vetores, visto que se manteve por 14 dias com temperatura acima de 40 °C e média acima de 45°C, com valor médio de 49,4 °C.

Ao passar do tempo, como também observado no trabalho de Wang *et al.* (2011), com a diminuição do substrato, a liberação de calor foi reduzida e quando a taxa de produção de calor foi menor que a taxa de perda de calor, a temperatura da pilha começou a diminuir aproximando-se da temperatura ambiente.

Pode-se inferir que a adição dos resíduos de alimentos, como fonte de substrato rapidamente degradável, auxiliou a pilha a atingir a temperatura termófila com o fornecimento de nutrientes necessário para que os micro-organismos se desenvolvessem.

Quanto ao valor de pH, a Figura 20 mostra a evolução desse parâmetro na pilha C.

Figura 20 - Valor do pH da pilha LC ao longo da segunda fase.



Fonte: Própria autora (2017).

Assim como na primeira fase, o valor do pH no início não seguiu exatamente o modelo típico descrito na literatura: ácido durante os primeiros dias como consequência, dentre outras possíveis causas, da degradação de polissacarídeos facilmente hidrolisados e novas sínteses de ácidos orgânicos (Jimenez e Garcia, 1991).

Nota-se que o processo iniciou-se em pH ácido e com o aumento da temperatura, o pH tendeu a crescer gradualmente. Jimenez e Garcia (1991) creditam esse fato à degradação dos ácidos orgânicos ou pela volatilização da amônia e que também é esperado ao término do processo que o pH caia ligeiramente para valores próximo à neutralidade o que não foi observado visto que o pH, ao fim do processo, apresentou valores próximos a 5,0, o que ocorreu na pilha ao fim dos 63 dias.

Sabe-se que o pH é um fator limitante no processo de compostagem, Diaz e Savage (2007) afirmam que a faixa ótima do valor de pH é entre 5,5 e 8,0 e, além disso, enquanto as bactérias preferem um pH quase neutro, fungos se desenvolvem melhor em um ambiente mais ácido. Observa-se que o pH subiu no início do processo, aproximou-se da neutralidade até cair ao fim do processo o que pode indicar a predominância de fungos na massa de compostagem.

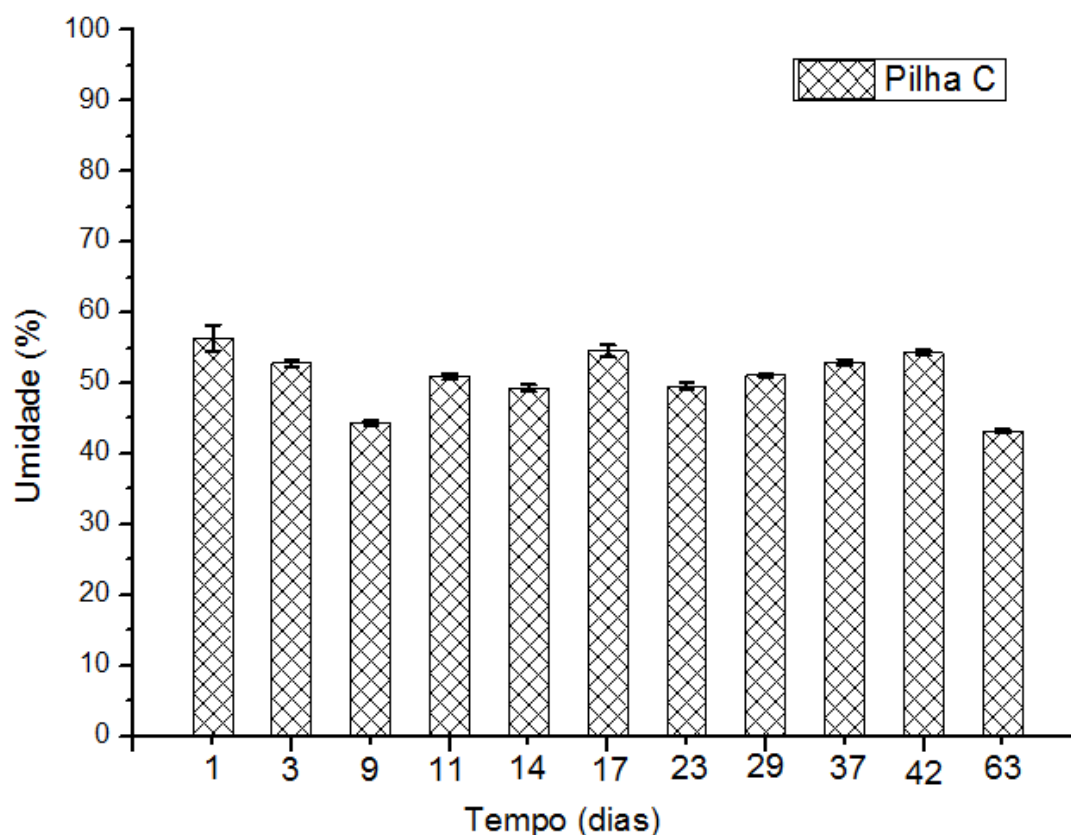
Segundo de Bertoldi *et al.*, (1983), os fungos se beneficiam da diminuição da temperatura, pH e teor de umidade que ocorrem à medida que o processo se desenvolve. Esses mesmos três fatores exercem positivamente influência na presença e difusão de actinomicetos, cuja atividade metabólica é fundamental para humificação da matéria orgânica.

Em relação do teor de umidade, como a segunda fase ocorreu com a mistura das pilhas da primeira fase, cuja umidade ao fim do processo estava abaixo dos 50%, os resíduos de alimentos, além de servirem como fontes de substrato rapidamente biodegradável, forneceram a água necessária para que a pilha alcançasse um teor de umidade próximo do ótimo.

A Figura 21 mostra o comportamento do teor de umidade da pilha ao longo do processo na segunda fase.



Figura 21 - Teor de umidade ao longo da segunda fase na pilha LC.



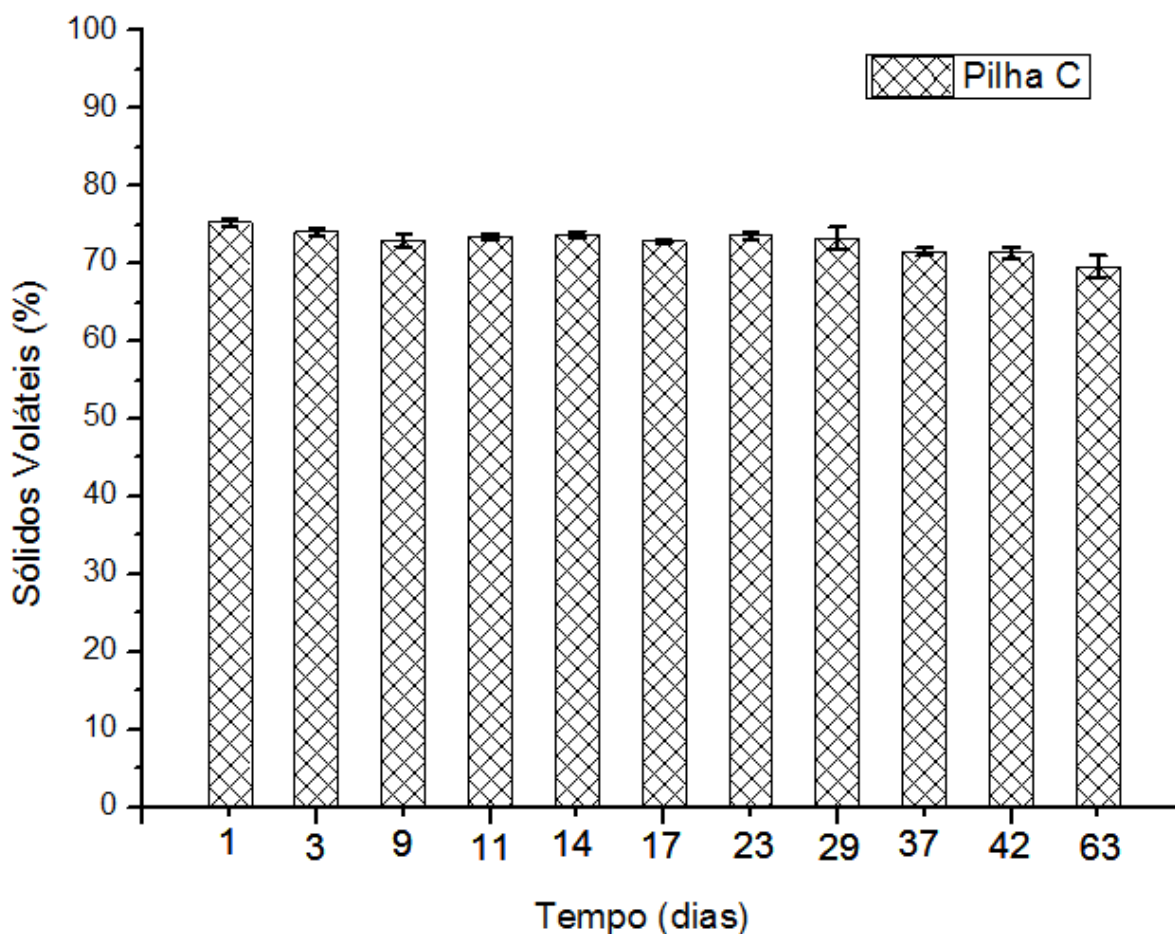
Fonte: Própria autora (2017).

Durante o início do processo houve queda mais acentuada da umidade, principalmente pelo fato da pilha ter atingido a fase termófila, quando há maior liberação de calor e, conseqüentemente, maior evaporação da água. Essa queda acentuada da umidade é esperada e é um fator limitante para o metabolismo dos micro-organismos principalmente na fase termófila quando há uma diminuição do teor de água (Wang *et al.*, 2011).

Sendo assim, da mesma forma que ocorreu na fase anterior, água foi adicionada nos dias 9, 17, 29, 37 e 42, quando a umidade estava abaixo do teor ótimo, a fim de garantir a atividade microbológica.

No que se refere aos sólidos voláteis, a Figura 22 mostra o comportamento desse parâmetro ao longo da segunda fase.

Figura 22 – Percentual de Sólidos Voláteis na pilha C ao longo da segunda fase.



Fonte: Própria autora (2017).

De forma semelhante à fase anterior, a degradação da matéria orgânica ocorreu de forma muito lenta, apesar da massa de compostagem ter atingido a fase termófila. Kulikowska e Klimiuk (2011) afirmam que altas temperaturas favorecem o crescimento de micro-organismos responsáveis pela decomposição da lignocelulose e formação de precursor de húmus. Em altas temperaturas, os actinomicetos, micro-organismos que atuam na decomposição da hemicelulose, são dominantes.

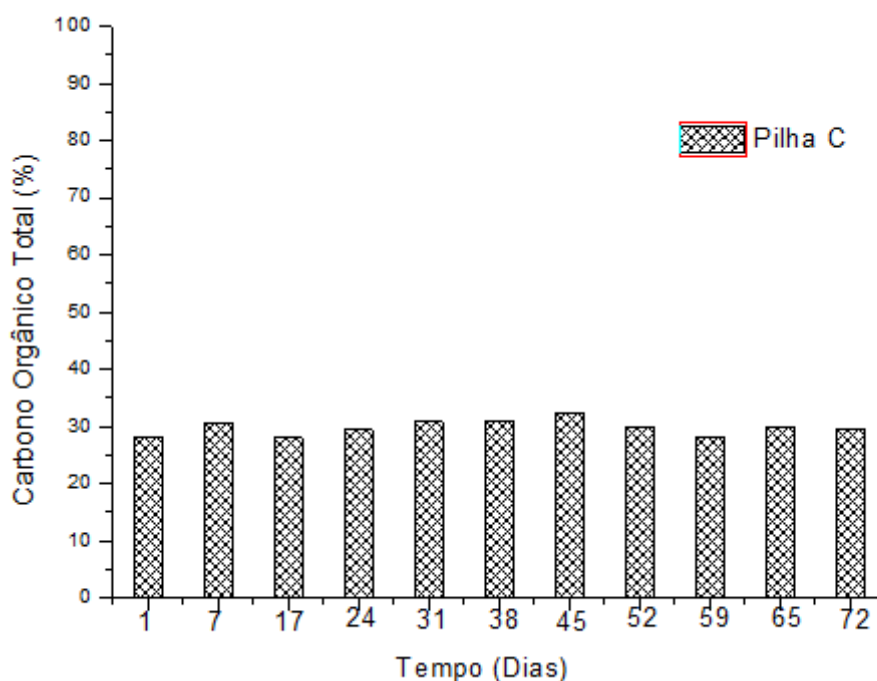
Fato é que, nesse experimento, não foi grande variação nos sólidos voláteis, assim como no experimento de Huang *et al.*(2014) que utilizaram esterco de porco e serragem na compostagem e também não observaram grande variação nos sólidos voláteis devido a presença de materiais recalcitrantes como celulose e lignina.

A Resolução CONAMA 375/2006 afirma que para o lodo ou produto derivado ser considerado estável e ter utilização agrícola, é preciso que a relação sólidos voláteis e sólidos totais seja menor que 0,70. Porém é importante ser crítico a essa

imposição visto que, conforme Diaz e Savage (2007), a suposição de que todas as substâncias com uma mesma concentração de sólidos orgânicos são igualmente estáveis não é necessariamente válida, porque uma substância que contenha sólidos orgânicos de difícil degradação (como é o caso da serragem) é mais estável do que uma que tenha uma concentração igual de sólidos orgânicos, mas de compostos que são prontamente degradados.

Quanto ao Carbono Orgânico Total (COT), a Figura 23 mostra a degradação da matéria orgânica na segunda fase.

Figura 23 - Evolução do Carbono Orgânico Total na segunda fase.

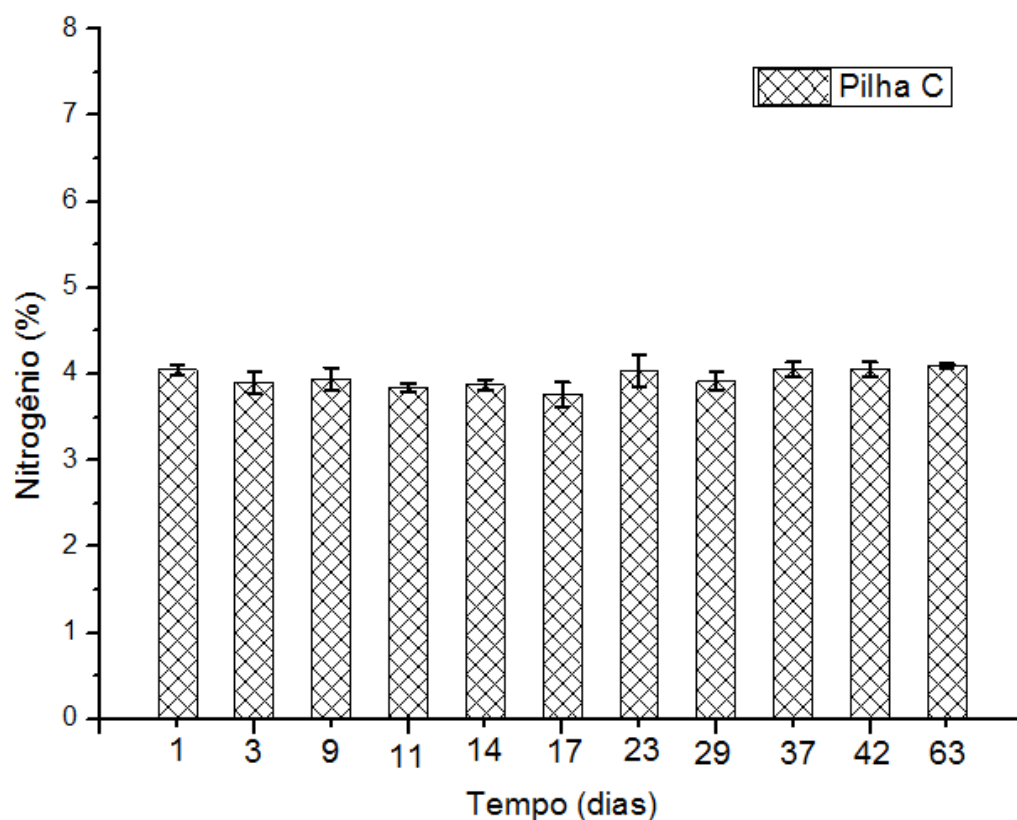


Fonte: Própria autora (2017).

No início do processo, a média do teor de COT era de 28,08% na pilha C e, ao fim do processo, o teor de COT foi de 29,47%, ou seja, houve um pequeno acréscimo de 5% o que mostra que apesar de ter alcançado a fase termófila, essa condição não foi suficiente para a degradação da matéria orgânica carbonácea presente na pilha, o que corrobora com os resultados da análise dos sólidos voláteis.

Semelhante ao ocorrido na primeira fase houve incremento do teor de NTK, porém na segunda fase foi menor. No início do processo, a média do teor de NTK era de  $4,0 \pm 0,0$  % na pilha C e Ao término do processo, o teor de NTK cresceu levemente e foi para  $4,1 \pm 0,2$  %, como pode ser visto na Figura 24.

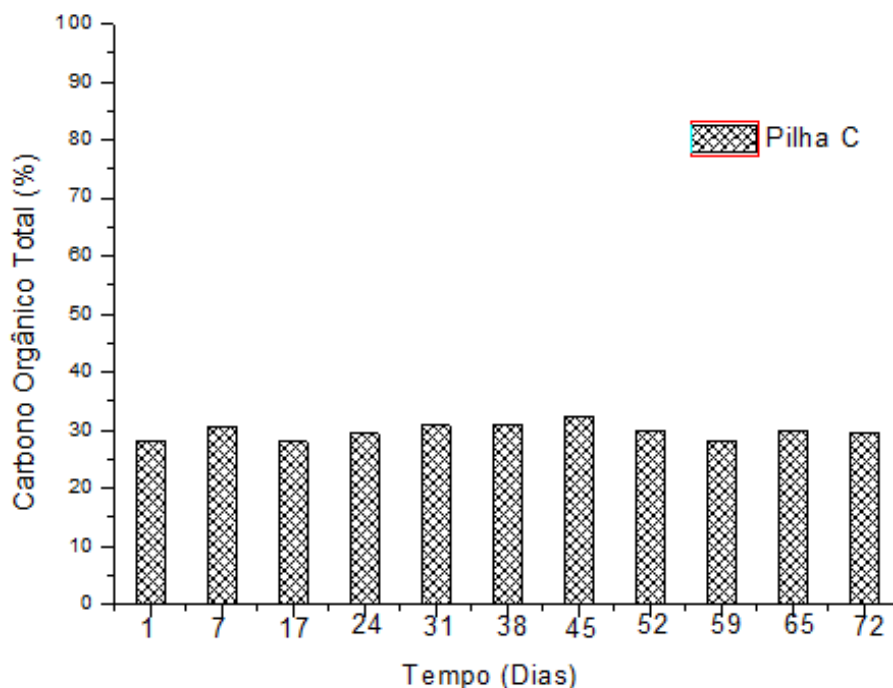
Figura 24 - Evolução do teor de Nitrogênio Total Kjeldahl na segunda fase.



Fonte: Própria autora (2017).

Quanto à relação C/N, a Figura 25 mostra a evolução desse parâmetro ao longo da primeira fase.

Figura 25 - Evolução da relação C/N durante a segunda fase.



Fonte: Própria autora (2017).

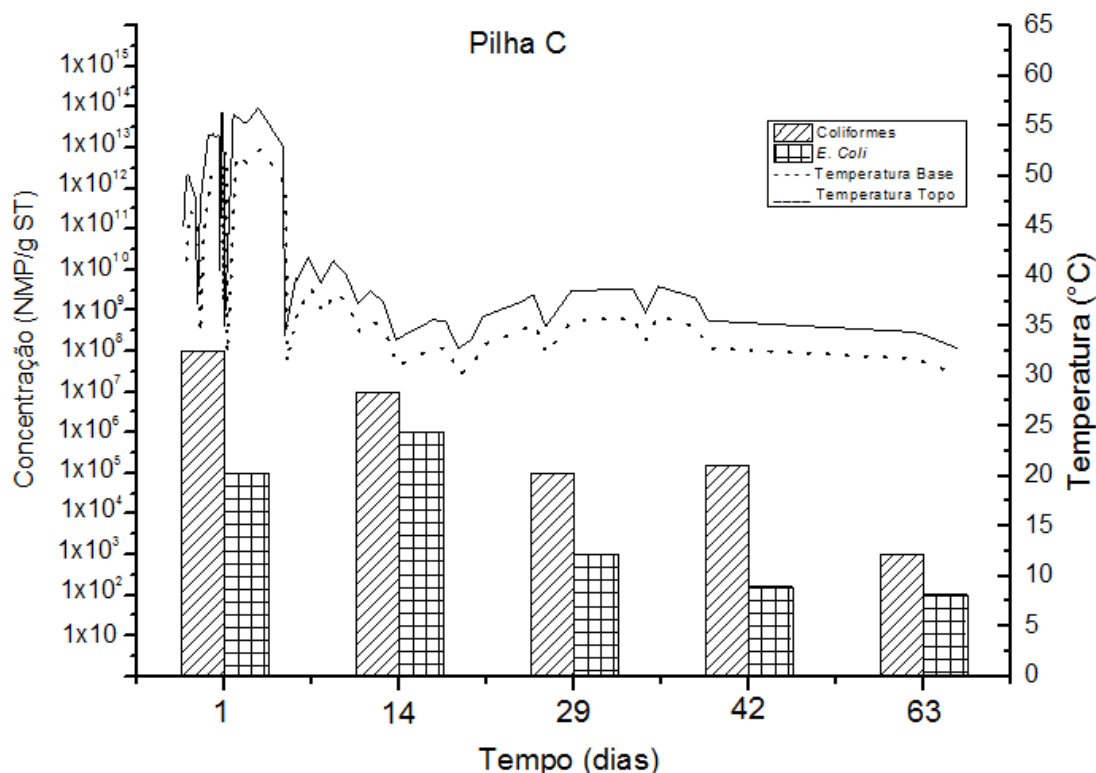
Assim como as pilhas da primeira fase, a pilha C não iniciou o processo com o valor considerado ideal (entre 20 e 30) mesmo com a adição da fonte de carbono rapidamente biodegradável. O processo iniciou com relação C/N de 6,9 e, ao fim do processo, a relação decaiu e finalizou essa fase em 6,3.

#### 5.1.2.2

#### *Parâmetros microbiológicos*

Na segunda fase, apesar de ter alcançado a fase termófila nos primeiros dias de experimento, nota-se que o decaimento bacteriano ocorreu lentamente, de forma semelhante ao ocorrido na primeira fase, como mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Evolução da concentração de coliformes totais e *E. coli* na pilha C.



Fonte: Própria autora (2017).

Apesar de nessa fase terem sido utilizadas matérias-primas (lodo e serragem) da fase anterior, onde já houve a redução dos coliformes totais e *E. coli*, os resíduos de alimentos aportaram uma concentração de coliformes totais  $> 1,1 \times 10^9$  NMP/ g de ST e de  $3,9 \times 10^5$  NMP/ g de ST de *E. coli*. Sendo assim, no início do processo na segunda fase, a pilha C possuía uma concentração de coliformes totais  $> 2,3 \times 10^8$  e  $1,0 \times 10^5$  de *E. coli* e, ao fim do processo, a concentração era de  $1,7 \times 10^3$  NMP/ g de ST e  $1,4 \times 10^2$  NMP/ g de ST de coliformes totais e *E. coli*, respectivamente.

Observa-se que, no dia 14, após fase termófila, houve queda na concentração dos coliformes totais, porém não da *E. coli*. Esse resultado é semelhante ao relatado por Gong *et al.* (2005) que notaram que algumas bactérias patogênicas sobreviveram apesar da temperatura do processo de compostagem ter atingido 54-67°C, mesmo que, geralmente, bactérias patogênicas serem destruídas rapidamente em altas temperaturas. Os autores concluíram também que há outros fatores importantes para a sobrevivência prolongada da *E. coli* na compostagem como, por exemplo, a umidade.

Turner (2002) também afirma que a inativação da *E. coli* não é meramente dependente da temperatura, mas também é afetado pelo teor de umidade e pela natureza do material. Além disso, a autora salienta ainda que se a inativação for incompleta devido às temperaturas abaixo da faixa termófila, é possível haver recuperação e crescimento dos micro-organismos.

Da mesma forma, Droffner e Brinton (1995) relataram a dificuldade de correlacionar a temperatura ou o tempo sob temperaturas elevadas com a destruição de patógenos (*E.coli* e *Salmonella*) no processo de compostagem, o que indica que o mecanismo para remoção desses micro-organismos é complexo e não, simplesmente, dependente da exposição a determinada temperatura.

Hess *et al.* (2004) analisaram, em reatores de bancada, a influência da fase termófila na sobrevivência de coliformes total e *E. coli*. Nos experimentos que alcançaram a fase termófila houve decréscimo dos micro-organismos após alcançar o pico de temperatura, inclusive chegando a níveis abaixo dos limites de detecção. Os experimentos que atingiram valores próximos a fase termófila teve uma diminuição na concentração de coliformes totais e *E. coli*, porém logo após o resfriamento rapidamente houve acréscimo, contudo, ao passar do tempo, a concentração de micro-organismos caiu novamente. Provavelmente, é por essa possibilidade de as bactérias crescerem novamente que a USEPA (1994) recomenda que as análises sejam realizadas o mais próximo possível da aplicação do composto.

Sendo assim, como no presente experimento a fase termófila só foi atingida no topo do experimento e houve zonas com temperaturas mais baixas, é possível então inferir que, provavelmente, mesmo com revolvimento diário a fim de que maior quantidade de biomassa atingisse o topo, houve zonas que favoreceram o desenvolvimento dos micro-organismos. Por isso, observa-se que a queda após a fase termófila não foi expressiva e o decaimento ocorreu ao longo do processo.

### 5.1.2.3

#### *Qualidade do Composto final*

Ao fim do processo, toda pilha LC foi peneirada e tanto o material retido quanto o peneirado foram verificados quanto a peso e volume, a Tabela 24 mostra os resultados encontrados.

Tabela 24 – Peso, volume e peso específico do material peneirado e retido do composto final.

Material	Peso (kg)	Volume (L)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )
Peneirado	94,1	196	480,10
Retido	54,8	161	340,1

Fonte: Própria autora (2017).

Considerando como composto apenas o material peneirado e que o processo se iniciou com 430 kg de lodo com volume de 490L, houve redução de, aproximadamente, 78% do peso e 60% do volume.

O material que ficou retido na peneira, basicamente formado por serragem, poderá ser utilizado novamente como *bulking agent* em um novo processo de compostagem e podendo atuar também como inóculo no processo de compostagem.

O resultado das análises do material peneirado é mostrado na Tabela 25 com o comparativo dos limites listados na Resolução CONAMA 375/2006.

Tabela 25 – Resultado da caracterização final do material peneirado e limites da Resolução CONAMA 375/2006.

Parâmetro	Limite Resolução CONAMA 375/2006	Composto final
<b>Indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos</b>		
Ovos viáveis de helmintos (ovos / g de ST)	< 0,25 (Classe A) < 10 (Classe B)	<0,25
Coliformes termotolerantes (NMP/g de ST)	<10 <sup>3</sup> (Classe A) < 10 <sup>6</sup> (Classe B)	< 1,1
<b>Substâncias inorgânicas</b>		
Arsênio (mg/kg, base seca)	41	<0,006
Bário (mg/kg, base seca)	1300	-
Cádmio (mg/kg, base seca)	39	2,3857 ± 0,2384
Chumbo (mg/kg, base seca)	300	<0,005
Cobre (mg/kg, base seca)	1500	296 ± 24
Cromo (mg/kg, base seca)	1000	18,7633 ± 1,2342
Mercúrio (mg/kg, base seca)	17	<0,0002
Molibdênio (mg/kg, base seca)	50	23,6733 ± 4,0010
Níquel (mg/kg, base seca)	420	21,8467 ± 3,1733
Selênio (mg/kg, base seca)	100	-
Zinco (mg/kg, base seca)	2800	809 ± 28

(continua)



Tabela 25 – (Conclusão)

Parâmetro	Limite Resolução CONAMA 375/2006	Composto final
<b>Potencial agrônômico</b>		
Cálcio total (% , base seca)	-	1,42 ± 0,15
Carbono orgânico (% , base seca)	-	31,84 ± 1,92
Enxofre total (% , base seca)	-	1,11 ± 0,08
Fósforo total (mg/kg, base seca)	-	4733,0000 ± 614,4493
Magnésio total (% , base seca)	-	0,16 ± 0,01
Nitrogênio amoniacal (mg N-NH <sub>3</sub> /g, base seca)	-	25,67 ± 1,15
Nitrogênio Kjeldahl (% , base seca)	-	4,44 ± 0,08
Nitrogênio nitrato/nitrito	-	-
pH em água (1:10)	-	-
Potássio total (mg/kg, base seca)	-	3538,3333 ± 446,0407
Sódio total (mg/kg, base seca)	-	1707 ± 50
Sólidos totais (%)	-	57,00 ± 0,39
Sólidos voláteis (%)	-	63,63 ± 0,61
Umidade (%)	-	43,00 ± 0,39
<b>Não listados na legislação</b>		
Boro (mg/kg, base seca)	-	6,7 ± 0,6
Capacidade de Retenção de Água (%)	-	127,32 ± 12,53
Capacidade de Troca Iônica (mmolc/kg)	-	620,00 ± 270,74
Cloro Solúvel em Água (%)	-	1,42 ± 0,65
Cobalto (mg/kg, base seca)	-	3,259 ± 0,443
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	-	0,49 ± 0,01
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) total (% , base seca)	-	1,7 ± 0,1
Ferro (mg/kg, base seca)	-	17970 ± 3190
pH (CaCl <sub>2</sub> 0,01 M)	-	4,6 ± 0,2
Potássio (K <sub>2</sub> O) total (% , base seca)	-	1,2 ± 0,1
Relação C/N (base seca)	-	7,3 ± 0,6
Resíduo Mineral (% , base seca)	-	11,24 ± 0,79
Resíduo Mineral Insolúvel (% , base seca)	-	18,04 ± 0,39
Resíduo Mineral Total (% , base seca)	-	29,28 ± 0,57
Silício (mg/kg)	-	24,827 ± 12,457
Umidade 60-65 °C (%)	-	38,65 ± 0,41

Fonte: Própria autora (2017).

Quanto aos parâmetros microbiológicos (ovos viáveis de helmintos e coliformes termotolerantes), observa-se que, quando comparado com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 375/2006, o material peneirado obteve concentrações inferiores ao preconizado na legislação. Caso não fossem exigidas as análises de *Salmonella* e vírus, poderia o composto até mesmo ser classificado como Classe A em relação aos parâmetros microbiológicos devido à concentração de ovos viáveis de helmintos e coliformes termotolerantes estarem abaixo do limite de detecção.

Das substâncias inorgânicas citadas na Resolução CONAMA 375/2006, algumas possuíam concentrações abaixo do limite de quantificação, foram elas: arsênio, chumbo e mercúrio. Cádmio, cobre, cromo, molibdênio, níquel e zinco, que também estão listados na legislação, apresentaram concentrações abaixo do limite. Da lista

de substâncias inorgânicas citadas na legislação apenas duas não foram analisadas, são elas: bário e selênio.

Os parâmetros listados na Resolução CONAMA 375/2006 para caracterização do potencial agrônômico não possuem concentrações limites listadas, mas auxiliam no projeto agrônômico a fim de definir a aplicação do composto em determinada área agrícola, observando sempre todos os critérios estabelecidos na legislação. Dos parâmetros listados na legislação apenas a análise de nitrato e nitrito não foram realizados.

Outra condição importante que a Resolução CONAMA 375/2006 traz em seu parágrafo único do Art. 1º da Resolução CONAMA é que a venda do lodo e seus produtos derivados deverá atender o disposto no Decreto no 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que regulamenta a 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.

Sendo assim, foi através da Instrução Normativa (IN) nº 25/2009 que o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabeleceu 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.

Essa IN denomina como Classe “D” o 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. A Tabela 26 mostra o resultado das análises do composto final e os limites estabelecidos pela IN, onde é possível observar que dentre os parâmetros analisados, apenas o pH estava abaixo do valor exigido, necessitando assim de correção para aplicação no solo.

Tabela 26 - Resultado da caracterização final do material peneirado e limites da Resolução CONAMA 375/2006.

Parâmetro	Instrução normativa 25/2009 – MAPA Composto Classe D	Valor encontrado
Umidade (Max.) (%)	70	38,64 ± 0,41
N total (min.) (%)	0,5	4,44 ± 0,08
*Carbono orgânico (mín.) (%)	15	32,93 ± 0,28
*CTC <sup>(1)</sup> (mmolc/kg)	Conforme declarado	620,00 ± 270,74
pH (mín.)	6,0	4,6 ± 0,17
Relação C/N (máx.)	20	7,41 ± 0,09

(continua)

Tabela 26 – (Conclusão).

Parâmetro	Instrução normativa 25/2009 – MAPA Composto Classe D	Valor encontrado
*Relação CTC/C	Conforme declarado	18,86 ± 8,38
Outros nutrientes	Conforme declarado	(**)

(\*) Valores expressos em base seca, umidade determinada a 65oC;

(\*\*) Valores encontrados na Tabela 25.

(1) É obrigatória a declaração no processo de registro de produto.

Fonte: Própria Autora (2017).

#### 5.1.2.4 *Levantamento de aspectos operacionais do processo de compostagem em ETE de pequeno porte*

A secagem do lodo através de leito de secagem, solução usual em projetos de ETE, atinge teores sólidos próximo de 30% (Gonçalves *et al.*, 2001), ou seja, um teor de umidade próximo de 70%, a depender das condições climáticas da região e do tempo de secagem projetado. Sendo assim, há necessidade de um material que possa, no processo de compostagem de lodo de esgoto, além de reduzir o teor de umidade seja capaz também de fornecer estrutura à pilha, visto que o lodo de esgoto possui granulometria muito pequena.

Assim, a escolha da serragem como *bulking agent* atende tanto por ser um material com baixa umidade quanto por fornecer a estrutura necessária para criar os espaços vazios necessários para melhorar a oxigenação da pilha, além de ser é um dos mais comuns na prática e também em diversos estudos (Boniecki *et al.*, 2012; Cukjati *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2014). Outro fator que auxilia na escolha da serragem é que, por se tratar de um resíduo gerado em madeireiras, seu custo financeiro é baixo e ainda é possível reaproveitar o material que não foi completamente degradado e que fica retido nas peneiras ao fim do processo, podendo ser reutilizado em novas pilhas.

Outro fator importante é a relação volumétrica adotada nesse estudo que está em concordância com as preocupações atuais de disponibilidade de material estruturante como citado por Cukjati *et al.* (2012) que conseguiu resultados satisfatórios mesmo com relação volumétrica lodo/resíduo maior. Além disso, Banegas *et al.* (2007) realizaram um estudo em leiras revolvidas que comparou as proporções volumétricas de 1:1 e 1:3 (lodo/serragem) e concluíram que a proporção 1:1 é uma opção mais econômica além de não provocar uma diluição nos componentes nutricionais.

Quanto à umidade, como relatado por Nikaeen *et al.* (2015), o alto teor de água gera uma dificuldade de aeração, o que poderia influenciar a fase termófila e foi perceptível durante a mistura da serragem ao lodo, uma grande dificuldade em homogeneizar a massa de resíduos devido às condições de umidade do lodo que tinha aspecto de lama. Vale salientar também que a serragem, devido a sua capacidade de absorção da água, facilitou a formação de pequenos aglomerados de difícil desagregação que grudavam facilmente nas ferramentas (enxadas e pás) e verificou-se que, aparentemente, a adição da serragem não agregou muito volume às pilhas.

Com o passar dos dias e realização do revolvimento, as pilhas foram perdendo umidade e foi possível homogeneizá-las mais facilmente. O processo de revolvimento consistia, além de abrir a pilha e misturá-la, na quebra manual dos aglomerados formados pelo lodo e a serragem como mostra a Figura 27.

Figura 27 – Aglomerados formados na compostagem de lodo de esgoto e serragem.



Fonte: Própria autora (2017).

No que diz respeito à escolha dos resíduos de alimentos como *amendment agent*, essa escolha é justificada pelo fato de ser um resíduo que é gerado diariamente na realidade dos condomínios ou mesmo de feiras locais e que, na maioria das vezes, não são aproveitados levando a ser direcionados para aterros sanitários sem

qualquer beneficiamento. Sendo assim, na possibilidade de adoção da compostagem de lodo de esgoto, é importante o engajamento da população local no sentido de segregação do resíduo orgânico para que possa ser coletado e incorporado ao processo.

Por fim, no que se refere à escala das pilhas de compostagem, é preciso atentar ao atendimento dos critérios de tempo-temperatura dos processos de redução significativa de patógenos e de atratividade de vetores da Resolução CONAMA 375/2006, haja vista que, como observado nesse estudo, não é possível alcançar longo tempo na fase termófila quando a escala é pequena, o que é o caso de grande parte das ETE descentralizadas, que possuem uma produção de lodo menor.

As exigências da legislação quanto ao binômio tempo-temperatura definem a classificação do produto gerado na compostagem. Pela impossibilidade de manter a pilha por longos períodos de tempo em altas temperaturas, é, praticamente, inviável obter um produto Classe A, que é, atualmente, o único permitido ao uso visto que a legislação vetou o uso do produto classe B, 5 anos após a publicação da legislação.

## 5.2 Análise econômico-financeira

### 5.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Os resultados do VPL para os cenários propostos estão na Tabela 27.

Tabela 27 – VPL para os cenários propostos.

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	-22.103,59	-112.158,78	-18.628,78	-98.259,51
2	-4.395,06	-41.324,66	-920,25	-27.425,40
3	-1.795,34	-30.925,78	1.679,37	-17.026,52
4	2.495,74	-13.761,43	5.970,56	137,83

Fonte: Própria Autora (2017).

Analisando os valores encontrados, observa-se no cenário 1 a inviabilidade financeira de adotar o uso do produto derivado da compostagem do lodo na agricultura com os critérios restritivos da Resolução CONAMA 375/2006 e a exigência de monitoramento de todos os parâmetros independentemente da classificação desejada e da quantidade de amostras. E, mesmo com a retirada de

substâncias orgânicas (cenário 2), o VPL continua negativo tanto para classe A quanto para B, independentemente do número de amostras.

No cenário 3, com retirada das substâncias orgânicas e inorgânicas e mantendo os parâmetros de sanidade e potencial agrônômico, é possível obter viabilidade financeira para obtenção de produto Classe B, desde que seja aceita a proposta de monitoramento utilizando apenas 1 amostra.

Quando apenas os critérios de sanidade são analisados (cenário 4) é possível até obter viabilidade financeira para a classificação do produto como classe A, desde que seja aceito o monitoramento por apenas uma amostra. Para a classificação como classe B nesse cenário, a viabilidade financeira existe tanto para o monitoramento com 1 amostra quanto para 4.

Observa-se assim que, se forem adotadas todas as exigências da Resolução CONAMA 375/2006 (Cenário 1, classe A, 4 amostras), o valor do VPL é negativo, indicando a inviabilidade financeira da adoção do processo de compostagem. Na medida em que há a flexibilização nas exigências tanto dos parâmetros a serem analisados quanto da quantidade de amostras, é possível verificar a viabilidade financeira. Outro fato importante a ser destacado é que os gestores das companhias de saneamento até os dias atuais tem dificuldade em contratar laboratórios para a realização das análises exigidas além dos custos elevados, sobretudo quando se trata de ETE de pequeno porte (Bittencourt, 2014).

A flexibilização condiz com o artigo 8 da Resolução que afirma que o órgão ambiental competente pode alterar a lista de substâncias analisadas a depender das características da bacia de esgotamento. No caso em estudo, por se tratar de uma ETE de pequeno porte, com uma rede coletora pequena e que dificilmente haverá contribuição clandestina é razoável retirar, pelo menos, as análises de substâncias orgânicas e inorgânicas ou até mesmo manter apenas os critérios de sanidade.

Comparando a legislação brasileira com a americana, Bastos *et al.* (2013) afirmam que a legislação brasileira, claramente inspirada na resolução americana denominada *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, Code of Federal Regulations, Part 503 of the Clean Water Act* (USEPA, 1994), consegue ser ainda mais restritiva que essa última. A legislação americana além de permitir o uso do produto Classe B (com restrições para uso), permite que essa classificação seja dada

apenas através do controle das condições operacionais especificadas para os Processos de Redução Significativa de Patógenos (PRSP).

### 5.2.2 Fluxo de caixa

A Tabela 28 mostra o fluxo de caixa para cada cenário a fim de avaliar os custos anuais da adoção do processo de compostagem.

Tabela 28– Fluxo de caixa para os cenários analisados.

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	-1.500,46	-15.086,82	-976,23	-12.989,88
2	1.171,17	-4.400,29	1.695,40	-2.303,35
3	1.563,38	-2.831,44	2.087,61	-734,50
4	2.210,76	-241,91	2.735,00	1.855,03

Fonte: Própria Autora (2017).

Pode-se observar que, em alguns casos em que o VPL é negativo, o fluxo de caixa é positivo o que mostra o peso dos custos de investimento na viabilidade do processo. Outra observação é que, mesmo nos cenários onde o fluxo de caixa é negativo, quando se divide o valor total pela população atendida (1.100 habitantes), analisando o cenário com maior déficit (cenário 1, classe A, quatro amostras), o custo é de R\$ 13,72/hab.ano o que não representa um valor per capita tão alto.

Além disso, vale destacar que quando o lodo é considerado rejeito e tem que ser disposto em aterro, há duas possibilidades: aterros sanitários exclusivos ou co-disposição com resíduos sólidos urbanos. A realidade é que aterros exclusivos demandam alto teor de sólidos ou mesmo que o lodo seja seco termicamente, enquanto a co-disposição com resíduos sólidos urbanos, de modo geral, não são aceitas pelas Prefeituras devido a possibilidade de dificultar a operação e também por representar um risco adicional de contaminação da área (Ludovice e Fernandes, 2001). Essa dificuldade de aceitação do lodo de esgoto em aterros foi algo que foi, inclusive, perceptível nessa pesquisa, visto a dificuldade de realizar orçamento em alguns aterros na região metropolitana de Salvador, que não aceitavam receber o lodo de esgoto.

Por todo o exposto, nota-se que a compostagem é um método para valorização do lodo de esgoto possui benefícios ambientais pela reinserção de nutrientes nos ciclos

biogeoquímicos, mas, atualmente, possui limitação financeira para implantação, devido, principalmente, aos custos e as análises exigidas no monitoramento determinado na Resolução CONAMA 375/2006.

Uma possibilidade para redução dos custos seria buscar subsídios governamentais para apoiar a adoção da compostagem na ETE em estudo visto que é uma forma de atender a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que impõe uma ordem de prioridade na gestão e gerenciamento dos resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. O lodo de esgoto não deve ser considerado rejeito visto seu potencial no uso agrícola e, com incentivos financeiros, é possível a utilização desse resíduo de forma ambientalmente adequada.

Por fim, após essa análise de VPL, a ferramenta Tabela de Dados do Microsoft Office Excel foi utilizada para verificar algumas variações da receita e do custo com o intuito de obter o VPL em diferentes cenários econômicos. Essa variação está descrita para cada cenário no Apêndice A.

### 5.2.3 Comercialização do composto final

Na análise de VPL inicial não foi considerada a comercialização do produto final, porém considerando o valor mínimo para obter VPL positivo (R\$ 0,01) foi calculado, nos cenários em que o VPL apresentou valor negativo, o preço de comercialização do produto para que houvesse viabilidade financeira. A Tabela 29 mostra os valores obtidos

Tabela 29 – Preço mínimo para obter VPL positivo nos cenários analisados.

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	277,89	1.410,09	234,21	1.235,34
2	55,26	519,54	11,57	344,80
3	22,57	388,81	-	214,06
4	-	173,01	-	-

Fonte: Própria Autora (2017).

Nota-se, novamente, o impacto financeiro dos custos das análises, pois é possível observar que nos cenários em que é proposto a análise de 4 amostras, é preciso um



valor de venda do produto final muito maior quando comparado ao mesmo cenário, mas com apenas 1 amostra apenas.

Considerando o rendimento do experimento do presente estudo, em que cerca de 490 L de lodo foi possível obter 196 L de composto, para a ETE em estudo que produz 1 m<sup>3</sup> de lodo por mês, tem-se que após o processo de compostagem é possível obter 4,8 m<sup>3</sup> de composto por ano. Sendo assim, o preço por m<sup>3</sup> de venda do composto para obter um VPL positivo é mostrado na Tabela 30.

Tabela 30 – Preço por m<sup>3</sup> do composto gerado para obter VPL positivo nos cenários analisados.

Cenário	Classe A		Classe B	
	1 amostra	4 amostras	1 amostra	4 amostras
1	57,89	293,77	48,79	257,36
2	11,51	108,24	2,41	71,83
3	4,70	81,00	-	44,60
4	-	36,04	-	-

Fonte: Própria Autora (2017).

Quando considerado o preço para venda do cenário exigido pela Resolução CONAMA 375/2006 (Cenário 1, Classe A, 4 amostras) e que é também o cenário com maior preço para obter o VPL positivo, tem-se que o custo por m<sup>3</sup> do composto fica R\$ 293,77. É preciso salientar que, o processo de compostagem em pequeno porte não se mostrou eficiente para obtenção de um produto Classe A quanto aos processos de redução adicional de patógenos, logo, provavelmente, não haveria um produto Classe A para venda.

Quando considerado o maior preço de venda do composto Classe B (Cenário 1, 4 amostras) o valor é de R\$ 257,36. Porém, como já citado anteriormente, a Resolução CONAMA 375/2006 não permite o uso desse produto Classe B desde 2011 (cinco anos após a publicação da resolução), diferentemente da legislação americana a qual afirma que o lodo ou produto derivado Classe B é permitido ser utilizado sendo até mesmo equivalente ao Classe A quanto à proteção da saúde humana e ambiental, ao Classe A desde que haja restrições no uso e cuidados na gestão.

Vale salientar que no parágrafo único do Art. 1º da Resolução CONAMA deixa claro que para a venda do lodo e seus produtos derivados deverá atentar o disposto no Decreto no 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que regulamenta a 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. Isso pode fazer com que o preço de venda do composto aumente para que obedeçam todos os aspectos legais da comercialização de fertilizante, o que não entrou na análise em estudo.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados nesse trabalho, conclui-se:

- Na compostagem de lodo anearóbio com lodo de reator UASB é necessário além do bulking *agent*, que confere estrutura e porosidade às pilhas, a incorporação de um *amendment agent*, como fonte de substrato rapidamente degradável, para que o processo atinja temperaturas termófilas e, assim possa ser sanitizado.
- Foi observado nas pilhas de compostagem que apesar de não ter alcançado a fase termófila, houve o decaimento dos coliformes totais e *E. coli* na primeira fase utilizando apenas o lodo anearóbio e a serragem como bulking agent.
- As análises de microbiologia do composto final mostraram que o composto possui concentração de coliformes termotolerantes e ovos viáveis de helmintos abaixo do limite de detecção, o que significa que o composto está, inclusive, com concentração abaixo do limite mais restritivo da legislação que é  $<10^3$  NMP/g de ST e 0,25 ovos/ g de ST, respectivamente.
- As análises das substâncias inorgânicas listadas na resolução CONAMA 375/2006 mostraram que o composto possui concentração abaixo do limite para todas as seguintes substâncias analisadas: arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel e zinco. As substâncias listadas na legislação e que não foi possível analisar nesse trabalho foram: bário e selênio.
- O fator escala nas pilhas de compostagem influencia na classificação do composto gerado, visto que os critérios dos processos de redução de patógenos da Resolução CONAMA 375/2006 para compostagem, utilizam o binômio tempo-temperatura e, em escalas menores é improvável que as pilhas mantenham temperaturas altas por longo período de tempo.

- A análise econômico-financeira através do método do VPL mostrou que a adoção do processo de compostagem como destinação ambientalmente adequada do lodo de esgoto é inviável em ETE de pequeno porte, sobretudo pelos custos das análises laboratoriais exigidas. Sendo assim, é necessária uma flexibilização na legislação brasileira para que o processo se torne viável financeiramente ou mesmo buscar subsídios governamentais que cubram os custos de monitoramento do processo. Outra possibilidade de viabilizar a compostagem do lodo de esgoto é através da comercialização do produto final, gerando assim uma receita que custeie os custos envolvidos no atendimento da legislação vigente.

## 7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para futuras pesquisas com compostagem de lodo de esgoto, recomenda-se:

- Buscar novos materiais para atuar como *bulking agent* de preferência que seja um resíduo e que possa ser reciclado.
- Verificar se a adição de *amendment agent*, de preferência uma material estéril, de forma constante no início do processo força a manutenção da fase termófila por maiores períodos, assim permitindo uma degradação da matéria orgânica mais intensa.
- Fazer o acompanhamento de outros parâmetros microbiológicos ao longo do processo, principalmente os listados na Resolução CONAMA 375/2006.
- Realizar o estudo de mercado e os principais entraves para comercialização do lodo de esgoto.



## 8 REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Desinfecção de lodo de esgoto anaeróbio para fins agrícolas**. 2014. 68p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENTAL FEDERATION (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed., Washington, APHA/AWWA/WEF, 2012.

ANDREOLI, C. V. (Coord). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Curitiba: PROSAB, v. 4, 2006.

ANDREOLI, C. V. *et al.* **A Gestão dos biossólidos gerados em Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico**. Engenharia e Construção, n. 24, 1998.

ANDREOLI, C.V (Coord). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. 1ª ed., Editora Rima. Rio de Janeiro, 2001.

ARIAS, V. Sánchez *et al.* **Respiration indices and stability measurements of compost through electrolytic respirometry**. Journal of environmental management, v. 95, p. S134-S138, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

BAHIA. **Lei Estadual nº 12.932/14**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. 2014.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão – Correção de valores**. Disponível em <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em 14 de outubro de 2016.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Básica de Juros da Economia Brasileira (Taxa Selic)**. Disponível em <http://www.bcb.gov.br/>>. Acesso em 14 de outubro de 2016.

BANEGAS, V. *et al.* **Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust.** Waste Management, v. 27, n. 10, p. 1317-1327, 2007.

BARROS, R.T.V. **Elementos de gestão de resíduos sólidos.** Belo Horizonte, 2012. 424 p.

BASTOS, R. K. X. *et al.* **Análise crítico-comparativa das regulamentações brasileira, estadunidense e britânica de qualidade microbiológica de biossólidos para uso agrícola.** Revista DAE, v. 191, p. 10-20, 2013.

BETTIOL, W.; DE CAMARGO, O. A. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349p.

BITTENCOURT, S. **Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06.** 2014. 200 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Grauação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná.

BOINA, W.L.O. **Análise das condições de desaguamento de lodos de ETEs em BAG's: O caso da ETE Limoeiro – Presidente Prudente - SP.** 2012. 98 p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BONIECKI, P. *et al.* **Artificial neural networks for modeling ammonia emissions released from sewage sludge composting.** Atmospheric Environment, v. 57, p. 49-54, 2012.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 25 de 23 de julho de 2009** – Aprova 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. 2009

\_\_\_\_\_. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências, 2007.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010. Brasil.



\_\_\_\_\_. **Lei Nº 6.938, de 12 de fevereiro de 1981.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências, 1981.

\_\_\_\_\_. **Lei Nº 9.605, de 31 de agosto de 1998.** Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências, 1998.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Agenda 21 Global.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>>. Acesso em: 4 de novembro de 2015.

\_\_\_\_\_. Ministério do Planejamento. **Programa de Aceleração do Crescimento, 2º Balanço 2015-2018.** Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/>>. Acesso em 28 de abril de 2016.

\_\_\_\_\_. Ministério da Saúde. **Portaria MS. nº 2914 de 12 de dezembro de 2011.** Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo e seu padrão de potabilidade, 2011.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 2005.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006.** Define critérios e procedimentos, para uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 2006.

BRIGHT, D. A.; HEALEY, N. **Contaminant risks from biosolids land application: contemporary organic contaminant levels in digested sewage sludge from five treatment plants in Greater Vancouver. British Columbia.** Environmental Pollution, v. 126, n. 1, p. 39-49, 2003.

CAI, Q. *et al.* **Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants, China.** Chemosphere, v. 68, n. 9, p. 1751-1762, 2007.

CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo.** Rio de Janeiro. PROSAB, p. 464, 1999.

CARVALHO, P. C. T. **Compostagem**. In: TSUTIYA, M.T. *et al.* *Biossólidos na agricultura*. São Paulo: Sabesp, p.181-208. 2001.

CHEN, Y.*et al.* **Utilization of solar energy in sewage sludge composting: Fertilizer effect and application**. *Waste Management*, v. 34, n. 11, 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 2007. p. 380.

CUKJATI, N. *et al.* **Composting of anaerobic sludge: An economically feasible element of a sustainable sewage sludge management**. *Journal of environmental management*, v. 106, p. 48-55, 2012.

DIAZ, L. F.; SAVAGE, G. M. **Factors that affect the process**. *Waste Management Series*, v. 8, p. 49-65, 2007.

DOUBLET, J. *et al.* **Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting; consequences on compost organic matter stability and N availability**. *Bioresource technology*, v. 102, n. 2, p. 1298-1307, 2011.

DE BERTOLDI, M. *et al.* **The biology of composting: a review**. *Waste Management e Research*, v. 1, n. 2, p. 157-176, 1983.

DROFFNER, M. L.; BRINTON, W. F. **Survival of E. coli and Salmonella populations in aerobic thermophilic composts as measured with DNA gene probes**. *Zentralblatt fur Hygiene und Umweltmedizin= International journal of hygiene and environmental medicine*, v. 197, n. 5, p. 387-397, 1995.

EKLIND, Y.; KIRCHMANN, H. **Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. II: nitrogen turnover and losses**. *Bioresource Technology*, v. 74, n. 2, p. 125-133, 2000.

EL FELS, L. *et al.* **Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests**. *International Biodeterioration e Biodegradation*, v. 87, p. 128-137, 2014.

EMBASA. **Especial Total Residence – Projeto de Esgotamento Sanitário**. Salvador, 2010. Elaborado por Gráfico Empreendimento LTDA.

EMBASA. **Guia do usuário**. Disponível em: <[http://www.embasa.ba.gov.br/sites/default/files/sala\\_imprensa/publicacoes/arq](http://www.embasa.ba.gov.br/sites/default/files/sala_imprensa/publicacoes/arq)

uivs/2015/12/22/guia\_usuario\_novos\_clientes\_revisao\_4nov2015\_web\_reduz.pdf>. Acesso em: 3 de setembro de 2016.

EPSTEIN, E. **The science of composting**. CRC press, 1996.

FARIA, M. F. **Avaliação da persistência de microrganismos patogênicos em solo cultivado com eucalipto e fertilizado com lodo de esgoto sanitário**. 2015. 60p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de ciência Agrônômicas da UNESP. Botucatu, São Paulo.

FERNANDES, F. *et al.* **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. In: **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. PROSAB, 1999.

FOUNTOULAKIS, M. S. *et al.* **Fate and effect of linuron and metribuzin on the co-composting of green waste and sewage sludge**. Waste management, v. 30, n. 1, p. 41-49, 2010.

GONÇALVES, R. F. *et al.* **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.

GONG, C. M. *et al.* **Survival of pathogenic bacteria in compost with special reference to Escherichia coli**. Journal of environmental sciences (China), v. 17, n. 5, p. 770, 2005.

HARRISON, E. Z. *et al.* **Organic chemicals in sewage sludges**. Science of the total environment, v. 367, n. 2, p. 481-497, 2006.

HESS, T. F. *et al.* **Heat inactivation of E. coli during manure composting**. Compost science e utilization, v. 12, n. 4, p. 314-322, 2004.

HUANG, G. F. *et al.* **Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust**. Waste management, v. 24, n. 8, p. 805-813, 2004.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2008.

INGELMO, F. *et al.* **Influence of organic matter transformations on the bioavailability of heavy metals in a sludge based compost**. Journal of environmental management, v. 95, p. S104-S109, 2012.

INSAM, H.; DE BERTOLDI, M. **Microbiology of the composting process.** Compost Science and Technology, p. 25-48, 2007.

JIMENEZ, E. I.; GARCIA, V. P. **Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity.** Resources, Conservation and Recycling, v. 6, n. 1, p. 45-60, 1991.

JONES, V. *et al.* **Concentrations of trace substances in sewage sludge from 28 wastewater treatment works in the UK.** Chemosphere, v. 111, p. 478-484, 2014.

KOMILIS, D. *et al.* **Monitoring and optimizing the co-composting of dewatered sludge: a mixture experimental design approach.** Journal of environmental management, v. 92, n. 9, p. 2241-2249, 2011.

KOSOBUCKI, P. *et al.* **Sewage Sludge Composting.** Polish Journal of Environmental Studies, v.9, n.4, p. 243-248, 2000.

KULIKOWSKA, D.; GUSIATIN, Z. M. **Sewage sludge composting in a two-stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment.** Waste Management, v. 38, p. 312-320, 2015.

KULIKOWSKA, D.; KLIMIUK, E. **Organic matter transformations and kinetics during sewage sludge composting in a two-stage system.** Bioresource technology, v. 102, n. 23, p. 10951-10958, 2011.

LASHERMES, G. *et al.* **Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility.** Waste Management, v. 32, n. 2, p. 271-277, 2012.

LI, Y. *et al.* **Ammonia emissions and biodegradation of organic carbon during sewage sludge composting with different extra carbon sources.** International Biodeterioration e Biodegradation, v. 85, p. 624-630, 2013a.

LI, Y. *et al.* **New insights into the interactions between carbon dioxide and ammonia emissions during sewage sludge composting.** Bioresource technology, v. 136, p. 385-393, 2013b.

LU, L. *et al.* **High-rate composting of barley dregs with sewage sludge in a pilot scale bioreactor.** Bioresource technology, v. 99, n. 7, p. 2210-2217, 2008.

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. **Principais tipos de transformação e descarte do lodo. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 1ª ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, p. 399-423, 2001.

MALIŃSKA, K. *et al.* **Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge.** Ecological Engineering, v. 71, p. 474-478, 2014.

MARQUES, I. S. **Oportunidade e desafios para adoção de tecnologias de baixa complexidade operacional em sistemas de esgotamento sanitário.** 2017. 116 p. Dissertação Mestrado. Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento. Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia.

MARQUEZI, M. C. **Comparação de metodologias para a estimativa do número mais provável (NMP) de coliformes em amostras de água.** 2010. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

MAULINI-DURAN, C. *et al.* **A systematic study of the gaseous emissions from biosolids composting: Raw sludge versus anaerobically digested sludge.** Bioresource Technology, v. 147, p. 43-51, 2013.

METCALF e EDDY INC. **Wastewater Engineering, Treatment and Reuse.** Revisão de George Tchobanoglous, Franklin Burton e David Stensel. 4. Ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MIYAZAWA, M. *et al.* **Absorção de metais pesados do lodo de esgoto pelo feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.).** Braz. arch. biol. technol, v. 41, n. 1, p. 115-27, 1998.

MOREIRA, R. S. **Aplicação de lodo de esgoto em latossolo distrófico: fertilidade e disponibilidade de metais pesados.** 2013. 50p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação Ecologia e Tecnologia Ambiental. Universidade Federal de Alfenas. Alfenas, Minas Gerais.

NIKAEEN, M. *et al.* **Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting.** Waste Management, v. 39, p. 104-110, 2015.

PIVELI, R.P. **Tratamento de esgotos sanitários.** Disponível em: <[http://www.pha.poli.usp.br/learq.aspx?id\\_arq=14718](http://www.pha.poli.usp.br/learq.aspx?id_arq=14718)>. Acesso em: 4 de agosto de 2016.

RANGEL, O. J. P. *al.* **Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, n. 3, p. 583-594, 2006.

REGO, E.E. **Curso de Engenharia Econômica.** Disponível em: <<http://www.veduca.com.br/assistir/engenharia-economica>>. Acesso em: 3 de outubro de 2016.

RIHANI, M. *et al.* **In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting.** Bioresource Technology, v. 101, n. 15, p. 5988-5995, 2010.

RODRÍGUEZ, L.*et al.* **Domestic sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Optimizing the thermophilic stage.** Journal of Environmental management, v. 112, p. 284-291, 2012.

ROGERS, H. R. *et al.* **The occurrence of chlorobenzenes and permethrins in twelve UK sewage sludges.** Water Research, v. 23, n. 7, p. 913-921, 1989.

ROGERS, H. R. **Sources, Behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges.** Science of the Total Environment, v. 185, n. 1, p. 3-26, 1996.

SALVADOR, R. M. **Detecção e quantificação de enterovirus em lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento de esgotos com potencial uso na agricultura do Estado de São Paulo.** 2011. 65 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Faculdade de Saúde Pública. Departamento de Saúde Ambiental. São Paulo.

SANTOS, E. R. **Caracterização química, microbiológica e toxicidade do lodo de esgoto da estação mangueira.** 2009.68p.Dissertação de Mestrado. 68p. Programs de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais. Universidade Católica de Pernambuco. Recife, Pernambuco.

SIDELKO, R. *et al.* **Two composting phases running in different process conditions timing relationship.** Bioresource Technology, v. 101, n. 17, p. 6692-6698, 2010.

SILVA, S. M. C. P. *et al.* **Principais contaminantes do lodo.** ANDREOLI, C.V. *et a.* **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG/SANEPAR, p. 69-122, 2001.

SINAPI – **Relatório de Insumos e Composições – AGO/16 – sem desoneração, publicado em 19 de setembro de 2016.** Disponível em <[http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_642](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_642)>. Acesso em: 14 de outubro de 2016.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014.** Disponível em <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 11 de outubro de 2016.

TRAUTMANN, N. M.; KRASNY, M. E. **Composting in the classroom: scientific inquiry for high school students.** Kendall/Hunt Publishing Company, 1998.

TSUTIYA, M. T. *et al.* **Biossólidos na agricultura.** Sabesp, 2001.

TURNER, C. **The thermal inactivation of E. coli in straw and pig manure.** Bioresource Technology, v. 84, n. 1, p. 57-61, 2002.

USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A plain English guide to the EPA 503 part biosolids rule.** Washington, 1994 Disponível em:<[https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a\\_plain\\_english\\_guide\\_to\\_the\\_epa\\_part\\_503\\_biosolids\\_rule.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/a_plain_english_guide_to_the_epa_part_503_biosolids_rule.pdf)>. Acesso em: 26 setembro de 2016.

VANZETTO, A. S. **Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto.** 185p. 2012. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM 139/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

VILLASENOR, J. *et al.* **Composting domestic sewage sludge with natural zeolites in a rotary drum reactor.** Bioresource Technology, v. 102, n. 2, p. 1447-1454, 2011.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3ª ed. Editora UFMG, 2005.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C.V. **Introdução.** In: ANDREOLI, C. V. *et al.* Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. v.6. Belo Horizonte:UFMG/SANEPAR, 2001.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. *et al.* **Remoção da umidade de lodos de esgotos.**In: ANDREOLI, C. V. *et al.*Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. v.6. Belo Horizonte: UFMG/SANEPAR, 2001b.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. **Lodos de esgotos: características e produção.** In: ANDREOLI, C. V.*et al.* Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. v.6. Belo Horizonte:UFMG/SANEPAR, 2001a.

WANG, K. *et al.* **Spatial distribution of dynamics characteristic in the intermittent aeration static composting of sewage sludge.** Bioresource Technology, v. 102, n. 9, p. 5528-5532, 2011.

WU, Chuandong *et al.* **Usage of pumice as bulking agent in sewage sludge composting.** Bioresource technology, v. 190, p. 516-521, 2015.

ZHOU, H.*et al.* **Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting.** Bioresource technology, v. 152, p. 329-336, 2014a.

ZHOU, H.*et al.***Simulation of water removal process and optimization of aeration strategy in sewage sludge composting.** Bioresourcetechnology, v. 171, p. 452-460, 2014b.



## APÊNDICE A – PLANILHAS DE CÁLCULO DO VPL

### Análise de VPL - Cenário 1A1

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Investimento		-13.878,33										
Receita		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Custo		-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46	-12.216,46
Valor Residual												
Fluxo de Caixa		-15.378,80	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46	-1.500,46
<b>VPL</b>	<b>-22.103,59</b>											
VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIACÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO												
	-22.103,59	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-22.695,28	-18.052,64	-12.943,36	-7.311,37	-1.093,47	5.781,63	13.394,36	21.835,42	31.207,15	41.624,92		
2,00%	-27.987,97	-23.345,34	-18.236,06	-12.604,07	-6.386,17	488,93	8.101,66	16.542,73	25.914,45	36.332,22		
3,00%	-33.812,67	-29.170,04	-24.060,75	-18.428,76	-12.210,87	-5.335,76	2.276,97	10.718,03	20.089,75	30.507,53		
4,00%	-40.233,25	-35.590,62	-30.481,33	-24.849,35	-18.631,45	-11.756,35	-4.143,62	4.297,45	13.669,17	24.086,95		
5,00%	-47.321,78	-42.679,15	-37.569,87	-31.937,88	-25.719,98	-18.844,88	-11.232,15	-2.791,08	6.580,64	16.998,41		
6,00%	-55.159,55	-50.516,91	-45.407,63	-39.775,64	-33.557,74	-26.682,64	-19.069,91	-10.628,85	-1.257,12	9.160,65		
7,00%	-63.838,22	-59.195,99	-54.086,30	-48.454,31	-42.236,41	-35.361,31	-27.748,58	-19.307,52	-9.935,79	481,98		
8,00%	-73.461,21	-68.818,58	-63.709,29	-58.077,31	-51.859,41	-44.984,30	-37.371,58	-28.930,51	-19.558,79	-9.141,01		
9,00%	-84.145,17	-79.502,54	-74.393,25	-68.761,26	-62.543,37	-55.668,26	-48.055,53	-39.614,47	-30.242,75	-19.824,97		
10,00%	-96.021,65	-91.379,02	-86.269,73	-80.637,74	-74.419,85	-67.544,74	-59.932,02	-51.490,95	-42.119,23	-31.701,45		



## Análise de VPL - Cenário 2A1

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa Selic	14,15%											
<b>VPL</b>	<b>-4.395,06</b>											
<b>Investimento</b>		-13.878,33										
<b>Receita</b>		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
<b>Custo</b>		-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83	-9.544,83
<b>Valor Residual</b>												
<b>Fluxo de Caixa</b>		-12.707,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17	1.171,17
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
		1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
	-4.395,06	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-3.933,23	709,40	5.818,69	11.450,67	17.668,57	24.543,67	32.156,40	40.597,47	49.969,19	60.386,96		
2,00%	-8.068,46	-3.425,83	1.683,45	7.315,44	13.533,34	20.408,44	28.021,17	36.462,24	45.833,96	56.251,73		
3,00%	-12.619,35	-7.976,72	-2.867,43	2.764,56	8.982,45	15.857,56	23.470,29	31.911,35	41.283,07	51.700,85		
4,00%	-17.635,81	-12.993,18	-7.883,89	-2.251,90	3.965,99	10.841,10	18.453,83	26.894,89	36.266,61	46.684,39		
5,00%	-23.174,14	-18.531,51	-13.422,22	-7.790,24	-1.572,34	5.302,76	12.915,49	21.356,56	30.728,28	41.146,05		
6,00%	-29.297,86	-24.655,22	-19.545,94	-13.913,95	-7.696,05	-820,95	6.791,78	15.232,85	24.604,57	35.022,34		
7,00%	-36.078,58	-31.435,95	-26.326,66	-20.694,67	-14.476,78	-7.601,67	11,06	8.452,12	17.823,84	28.241,62		
8,00%	-43.597,11	-38.954,48	-33.845,19	-28.213,20	-21.995,31	-15.120,20	-7.507,47	933,59	10.305,32	20.723,09		
9,00%	-51.944,58	-47.301,95	-42.192,66	-36.560,67	-30.342,78	-23.467,67	-15.854,94	-7.413,88	1.957,84	12.375,62		
10,00%	-61.223,78	-56.581,15	-51.471,86	-45.839,87	-39.621,98	-32.746,87	-25.134,14	-16.693,08	-7.321,36	3.096,42		

## Análise de VPL - Cenário 2A4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Taxa de crescimento	0,00%	Investimento	-13.878,33									
Taxa de crescimento	0,00%	Receita	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Taxa Selic	14,15%	Custo	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29	-15.116,29
		Valor Residual										
		Fluxo de Caixa	-18.278,62	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29	-4.400,29
<b>VPL</b>	<b>-41.324,66</b>											
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
	<b>-41.324,66</b>	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-43.059,84	-38.417,21	-33.307,92	-27.675,94	-21.458,04	-14.582,94	-6.970,21	1.470,86	10.842,58	21.260,36		
2,00%	-49.608,87	-44.966,24	-39.856,95	-34.224,96	-28.007,07	-21.131,96	-13.519,23	-5.078,17	4.293,55	14.711,33		
3,00%	-56.816,17	-52.173,54	-47.064,25	-41.432,27	-35.214,37	-28.339,26	-20.726,54	-12.285,47	-2.913,75	7.504,03		
4,00%	-64.760,81	-60.118,18	-55.008,89	-49.376,90	-43.159,01	-36.283,90	-28.671,17	-20.230,11	-10.858,39	-440,61		
5,00%	-73.531,95	-68.889,32	-63.780,03	-58.148,04	-51.930,15	-45.055,04	-37.442,31	-29.001,25	-19.629,53	-9.211,75		
6,00%	-83.230,16	-78.587,53	-73.478,24	-67.846,26	-61.628,36	-54.753,26	-47.140,53	-38.699,46	-29.327,74	-18.909,96		
7,00%	-93.968,89	-89.326,26	-84.216,97	-78.584,98	-72.367,09	-65.491,98	-57.879,25	-49.438,19	-40.066,47	-29.648,69		
8,00%	-105.876,09	-101.233,46	-96.124,18	-90.492,19	-84.274,29	-77.399,19	-69.786,46	-61.345,39	-51.973,67	-41.555,90		
9,00%	-119.096,11	-114.453,47	-109.344,19	-103.712,20	-97.494,30	-90.619,20	-83.006,47	-74.565,40	-65.193,68	-54.775,91		
10,00%	-133.791,71	-129.149,08	-124.039,79	-118.407,80	-112.189,91	-105.314,80	-97.702,07	-89.261,01	-79.889,29	-69.471,51		

### Análise de VPL - Cenário 3A1

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Investimento		-13.878,33										
Receita		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Custo		-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62	-9.152,62
Valor Residual												
Fluxo de Caixa		-12.314,95	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38	1.563,38
<b>VPL</b>	<b>-1.795,34</b>											
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
	<b>-1.795,34</b>	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-1.178,85	3.463,78	8.573,07	14.205,06	20.422,95	27.298,06	34.910,78	43.351,85	52.723,57	63.141,35		
2,00%	-5.144,16	-501,53	4.607,76	10.239,75	16.457,64	23.332,75	30.945,48	39.386,54	48.758,26	59.176,04		
3,00%	-9.508,04	-4.865,41	243,88	5.875,86	12.093,76	18.968,87	26.581,59	35.022,66	44.394,38	54.812,16		
4,00%	-14.318,37	-9.675,73	-4.566,45	1.065,54	7.283,44	14.158,54	21.771,27	30.212,34	39.584,06	50.001,83		
5,00%	-19.629,12	-14.986,49	-9.877,20	-4.245,22	1.972,68	8.847,79	16.460,51	24.901,58	34.273,30	44.691,08		
6,00%	-25.501,20	-20.858,57	-15.749,28	-10.117,30	-3.899,40	2.975,71	10.588,43	19.029,50	28.401,22	38.619,00		
7,00%	-32.003,29	-27.360,66	-22.251,37	-16.619,39	-10.401,49	-3.526,39	4.086,34	12.527,41	21.899,13	32.316,90		
8,00%	-39.212,87	-34.570,24	-29.460,96	-23.828,97	-17.611,07	-10.735,97	-3.123,24	5.317,83	14.689,55	25.107,32		
9,00%	-47.217,34	-42.574,70	-37.465,42	-31.833,43	-25.615,53	-18.740,43	-11.127,70	-2.686,63	6.685,09	17.102,86		
10,00%	-56.115,24	-51.472,61	-46.363,32	-40.731,33	-34.513,44	-27.638,33	-20.025,60	-11.584,54	-2.212,82	8.204,96		

## Análise de VPL - Cenário 3A4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Investimento		-13.878,33										
Receita		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Custo		-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44	-13.547,44
Valor Residual												
Fluxo de Caixa		-16.709,77	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44	-2.831,44
<b>VPL</b>	<b>-30.925,78</b>											
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
	<b>-30.925,78</b>	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-32.042,31	-27.399,68	-22.290,39	-16.658,40	-10.440,51	-3.565,40	4.047,33	12.488,39	21.860,11	32.277,89		
2,00%	-37.911,64	-33.269,01	-28.159,73	-22.527,74	-16.309,84	-9.434,74	-1.822,01	6.619,06	15.990,78	26.408,55		
3,00%	-44.370,93	-39.728,30	-34.619,02	-28.987,03	-22.769,13	-15.894,03	-8.281,30	159,77	9.531,49	19.949,26		
4,00%	-51.491,04	-46.848,40	-41.739,12	-36.107,13	-29.889,23	-23.014,13	-15.401,40	-6.960,33	2.411,39	12.829,16		
5,00%	-59.351,86	-54.709,23	-49.599,94	-43.967,96	-37.750,06	-30.874,96	-23.262,23	-14.821,16	-5.449,44	4.968,34		
6,00%	-68.043,54	-63.400,91	-58.291,62	-52.659,64	-46.441,74	-39.566,64	-31.953,91	-23.512,84	-14.141,12	-3.723,35		
7,00%	-77.667,75	-73.025,12	-67.915,83	-62.283,84	-56.065,95	-49.190,84	-41.578,11	-33.137,05	-23.765,33	-13.347,55		
8,00%	-88.339,16	-83.696,53	-78.587,24	-72.955,26	-66.737,36	-59.862,26	-52.249,53	-43.808,46	-34.436,74	-24.018,96		
9,00%	-100.187,13	-95.544,50	-90.435,21	-84.803,23	-78.585,33	-71.710,23	-64.097,50	-55.656,43	-46.284,71	-35.866,93		
10,00%	-113.357,55	-108.714,92	-103.605,63	-97.973,64	-91.755,74	-84.880,64	-77.267,91	-68.826,85	-59.455,12	-49.037,35		

## Análise de VPL - Cenário 4A1

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa Selic	14,15%											
<b>Investimento</b>		-13.878,33										
<b>Receita</b>		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
<b>Custo</b>		-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24	-8.505,24
<b>Valor Residual</b>												
<b>Fluxo de Caixa</b>		-11.667,57	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76	2.210,76
<b>VPL</b>	<b>2.495,74</b>											
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
2.495,74	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%		
1,00%	3.367,52	8.010,15	13.119,44	18.751,43	24.969,32	31.844,43	39.457,16	47.898,22	57.269,94	67.687,72		
2,00%	-317,31	4.325,32	9.434,61	15.066,59	21.284,49	28.159,59	35.772,32	44.213,39	53.585,11	64.002,88		
3,00%	-4.372,53	270,10	5.379,39	11.011,38	17.229,27	24.104,38	31.717,11	40.158,17	49.529,89	59.947,67		
4,00%	-8.842,61	-4.199,98	909,31	6.541,30	12.759,19	19.634,30	27.247,03	35.688,09	45.059,81	55.477,59		
5,00%	-13.777,72	-9.135,09	-4.025,81	1.606,18	7.824,08	14.699,18	22.311,91	30.752,98	40.124,70	50.542,47		
6,00%	-19.234,46	-14.591,83	-9.482,54	-3.850,55	2.367,34	9.242,45	16.855,18	25.296,24	34.667,96	45.085,74		
7,00%	-25.276,65	-20.634,01	-15.524,73	-9.892,74	-3.674,84	3.200,26	10.812,99	19.254,06	28.625,78	39.043,55		
8,00%	-31.976,28	-27.333,65	-22.224,36	-16.592,37	-10.374,48	-3.499,37	4.113,36	12.554,42	21.926,14	32.343,92		
9,00%	-39.414,57	-34.771,94	-29.662,65	-24.030,66	-17.812,77	-10.937,66	-3.324,93	5.116,13	14.487,85	24.905,63		
10,00%	-47.683,10	-43.040,47	-37.931,19	-32.299,20	-26.081,30	-19.206,20	-11.593,47	-3.152,40	6.219,32	16.637,09		

### Análise de VPL - Cenário 4A4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Investimento		-13.878,33										
Receita		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Custo		-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91	-10.957,91
Valor Residual												
Fluxo de Caixa		-14.120,24	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91	-241,91
<b>VPL</b>		<b>-13.761,43</b>										
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
		1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-13.761,43	-13.856,82	-9.214,19	-4.104,90	1.527,08	7.744,98	14.620,08	22.232,81	30.673,88	40.045,60	50.463,38	
2,00%	-18.604,26	-13.961,63	-8.852,34	-3.220,35	2.997,54	9.872,65	17.485,38	25.926,44	35.298,16	45.715,94		
3,00%	-23.828,88	-19.186,25	-14.076,97	-8.444,98	-2.227,08	4.648,02	12.260,75	20.701,82	30.073,54	40.491,31		
4,00%	-29.588,01	-24.945,38	-19.836,09	-14.204,10	-7.986,21	-1.111,10	6.501,62	14.942,69	24.314,41	34.732,19		
5,00%	-35.946,27	-31.303,64	-26.194,35	-20.562,37	-14.344,47	-7.469,37	143,36	8.584,43	17.956,15	28.373,92		
6,00%	-42.976,58	-38.333,95	-33.224,66	-27.592,67	-21.374,78	-14.499,67	-6.886,94	1.554,12	10.925,85	21.343,62		
7,00%	-50.761,16	-46.118,53	-41.009,24	-35.377,25	-29.159,36	-22.284,25	-14.671,52	-6.230,46	3.141,26	13.559,04		
8,00%	-59.392,78	-54.750,15	-49.640,86	-44.008,87	-37.790,98	-30.915,87	-23.303,14	-14.862,08	-5.490,36	4.927,42		
9,00%	-68.976,06	-64.333,43	-59.224,14	-53.592,16	-47.374,26	-40.499,16	-32.886,43	-24.445,36	-15.073,64	-4.655,86		
10,00%	-79.629,01	-74.986,38	-69.877,09	-64.245,11	-58.027,21	-51.152,10	-43.539,38	-35.098,31	-25.726,59	-15.308,81		



## Análise de VPL - Cenário 1B1

		ANO											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20	
Taxa de crescimento	0,00%	Investimento	-13.878,33										
Taxa de crescimento	0,00%	Receita	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	
Taxa Selic	14,15%	Custo	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23	-11.692,23
VPL	-18.628,78	Valor Residual											
		Fluxo de Caixa	-14.854,56	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23	-976,23
VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO													
	-18.628,78	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%		
1,00%	-19.013,74	-14.371,11	-9.261,82	-3.629,83	2.588,07	9.463,17	17.075,90	25.516,96	34.888,69	45.306,46			
2,00%	-24.079,31	-19.436,68	-14.327,40	-8.695,41	-2.477,51	4.397,59	12.010,32	20.451,39	29.823,11	40.240,88			
3,00%	-29.654,06	-25.011,43	-19.902,14	-14.270,15	-8.052,26	-1.177,15	6.435,58	14.876,64	24.248,37	34.666,14			
4,00%	-35.799,12	-31.156,49	-26.047,20	-20.415,21	-14.197,32	-7.322,21	290,52	8.731,58	18.103,30	28.521,08			
5,00%	-42.583,47	-37.940,84	-32.831,55	-27.199,56	-20.981,67	-14.106,56	-6.483,83	1.947,23	11.318,95	21.736,73			
6,00%	-50.084,90	-45.442,26	-40.332,98	-34.700,99	-28.483,09	-21.607,99	-13.995,26	-5.554,19	3.817,53	14.235,30			
7,00%	-58.391,15	-53.748,51	-48.639,23	-43.007,24	-36.789,34	-29.914,24	-22.301,51	-13.860,44	-4.488,72	5.929,05			
8,00%	-67.601,20	-62.958,56	-57.849,28	-52.217,29	-45.999,39	-39.124,29	-31.511,56	-23.070,49	-13.698,77	-3.281,00			
9,00%	-77.826,68	-73.184,05	-68.074,76	-62.442,78	-56.224,88	-49.349,78	-41.737,05	-33.295,98	-23.924,26	-13.506,49			
10,00%	-89.193,52	-84.550,89	-79.441,60	-73.809,61	-67.591,71	-60.716,61	-53.103,88	-44.662,82	-35.291,09	-24.873,32			

### Análise de VPL - Cenário 1B4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9..	20
Taxa de crescimento	0,00%											
Investimento		-13.878,33										
Receita		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Taxa de crescimento	0,00%											
Custo		-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88	-23.705,88
Valor Residual												
Fluxo de Caixa		-26.868,21	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88	-12.989,88
VPL	-98.259,51											
VALOR DO VPLA PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO												
	-98.259,51	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-108.381,86	-98.739,23	-99.629,94	-87.997,95	-81.780,06	-74.904,95	-67.292,22	-58.851,16	-49.479,44	-39.061,66		
2,00%	-113.652,27	-109.009,63	-109.900,35	-98.268,36	-92.050,45	-85.175,36	-77.562,63	-69.121,56	-59.749,84	-49.332,07		
3,00%	-124.955,00	-120.312,37	-115.203,08	-109.571,10	-103.353,20	-96.478,10	-88.865,37	-80.424,30	-71.052,58	-60.634,81		
4,00%	-137.414,05	-132.771,42	-127.662,14	-122.030,15	-115.812,25	-108.957,15	-101.324,42	-92.883,35	-83.511,63	-73.093,86		
5,00%	-151.169,25	-146.526,62	-141.417,34	-135.785,35	-129.567,45	-122.692,35	-115.079,62	-106.638,55	-97.266,83	-86.849,06		
6,00%	-166.378,32	-161.735,69	-156.626,40	-150.994,42	-144.776,52	-137.901,42	-130.288,69	-121.847,62	-112.475,90	-102.058,13		
7,00%	-183.219,16	-178.576,53	-173.467,24	-167.835,26	-161.617,36	-154.742,26	-147.129,53	-138.688,46	-129.316,74	-118.898,96		
8,00%	-201.892,44	-197.249,81	-192.140,53	-186.508,54	-180.290,64	-173.415,54	-165.802,81	-157.361,74	-147.990,02	-137.572,25		
9,00%	-222.624,52	-217.981,89	-212.872,60	-207.240,61	-201.022,71	-194.147,61	-186.534,88	-178.093,82	-168.722,09	-158.304,32		
10,00%	-245.670,66	-241.028,03	-235.918,74	-230.286,76	-224.068,86	-217.193,76	-209.581,05	-201.139,96	-191.768,24	-181.350,47		

## Análise de VPL - Cenário 2B1

		ANO											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20	
Taxa de crescimento	0,00%	Investimento	-13.878,33										
Taxa de crescimento	0,00%	Receita	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	
Taxa Selic	14,15%	Custo	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	-9.020,60	
		Valor Residual											
		Fluxo de Caixa	-12.182,93	1.695,40	1.695,40	1.695,40	1.695,40	1.695,40	1.695,40	1.695,40	1.695,40	1.695,40	
<b>VPL</b>	<b>-920,25</b>												
		<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>											
		-920,25	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
	1,00%	-251,69	4.390,94	9.500,22	15.132,21	21.350,11	28.225,21	35.837,94	44.279,01	53.650,73	64.068,50		
	2,00%	-4.199,80	482,83	5.592,11	11.224,10	17.442,00	24.317,10	31.929,83	40.370,90	49.742,62	60.160,39		
	3,00%	-8.460,74	-3.818,11	1.291,18	6.923,17	13.141,06	20.016,17	27.628,90	36.069,96	45.441,68	55.859,46		
	4,00%	-13.201,68	-8.559,04	-3.449,76	2.182,23	8.400,13	15.275,23	22.887,96	31.329,02	40.700,75	51.118,52		
	5,00%	-18.435,83	-13.793,19	-8.683,91	-3.051,92	3.165,98	10.041,08	17.653,81	26.094,88	35.466,60	45.884,37		
	6,00%	-24.223,20	-19.580,57	-14.471,29	-8.839,30	-2.621,40	4.253,70	11.866,43	20.307,50	29.679,22	40.096,99		
	7,00%	-30.631,51	-25.988,87	-20.879,59	-15.247,60	-9.029,70	-2.154,60	5.458,13	13.899,20	23.270,92	33.688,69		
	8,00%	-37.737,09	-33.094,46	-27.985,17	-22.353,19	-16.135,29	-9.260,19	-1.647,46	6.793,61	16.165,33	26.583,10		
	9,00%	-45.626,09	-40.983,46	-35.874,17	-30.242,19	-24.024,29	-17.149,19	-9.536,46	-1.095,39	8.276,33	18.694,10		
	10,00%	-54.395,65	-49.753,01	-44.643,73	-39.011,74	-32.793,84	-25.918,74	-18.306,01	-9.864,94	-493,22	9.924,55		

### Análise de VPL - Cenário 2B4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
	Investimento	-13.878,33										
Taxa de crescimento	0,00%	Receita	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Taxa de crescimento	0,00%	Custo	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35	-13.019,35
Taxa Selic	14,15%	Valor Residual										
	Fluxo de Caixa	-16.181,68	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35	-2.303,35
<b>VPL</b>	<b>-27.425,40</b>											
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIACÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
	-27.425,40	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-28.333,69	-23.691,05	-18.581,77	-12.949,78	-6.731,88	143,22	7.755,95	16.197,02	25.568,74	35.986,51		
2,00%	-33.974,23	-29.331,60	-24.222,31	-18.590,32	-12.372,42	-5.497,32	2.115,41	10.556,47	19.928,20	30.345,97		
3,00%	-40.181,73	-35.539,10	-30.429,81	-24.797,82	-18.579,93	-11.704,82	-4.092,09	4.348,97	13.720,69	24.138,47		
4,00%	-47.024,28	-42.381,65	-37.272,36	-31.640,38	-25.422,48	-18.547,38	-10.934,65	-2.493,58	6.878,14	17.295,91		
5,00%	-54.578,68	-49.936,05	-44.828,77	-39.194,78	-32.976,88	-26.101,78	-18.489,05	-10.047,98	-676,26	9.741,51		
6,00%	-62.991,56	-58.288,92	-53.179,64	-47.547,65	-41.329,75	-34.454,65	-26.841,92	-18.400,85	-9.029,13	1.388,64		
7,00%	-72.180,60	-67.537,97	-62.428,68	-56.796,70	-50.578,80	-43.703,70	-36.090,97	-27.649,90	-18.278,18	-7.860,41		
8,00%	-82.436,03	-77.793,40	-72.684,11	-67.052,13	-60.834,23	-53.959,13	-46.346,40	-37.905,33	-28.533,61	-18.115,84		
9,00%	-93.822,16	-89.179,53	-84.070,24	-78.438,25	-72.220,36	-65.345,25	-57.732,52	-49.291,46	-39.919,74	-29.501,96		
10,00%	-106.479,18	-101.836,55	-96.727,26	-91.095,27	-84.877,38	-78.002,27	-70.389,54	-61.948,48	-52.576,76	-42.158,98		



### Análise de VPL - Cenário 3B4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa Selic	14,15%											
<b>VPL</b>	<b>-17.026,52</b>											
		<b>Investimento</b>	-13.878,33									
		<b>Receita</b>	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
		<b>Custo</b>	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50	-11.450,50
		<b>Valor Residual</b>										
		<b>Fluxo de Caixa</b>	-14.612,83	-734,50	-734,50	-734,50	-734,50	-734,50	-734,50	-734,50	-734,50	-734,50
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
	-17.026,52	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	-17.316,15	-12.673,52	-7.564,24	-1.932,25	4.285,65	11.160,75	18.773,48	27.214,55	36.586,27	47.004,04		
2,00%	-22.277,00	-17.634,37	-12.525,08	-6.893,10	-675,20	6.199,90	13.812,63	22.253,70	31.625,42	42.043,19		
3,00%	-27.736,49	-23.093,86	-17.984,57	-12.352,99	-6.134,69	740,41	8.353,14	16.794,21	26.165,93	36.583,70		
4,00%	-33.754,51	-29.111,88	-24.002,59	-18.370,60	-12.152,71	-5.277,60	2.335,12	10.776,19	20.147,91	30.565,69		
5,00%	-40.398,60	-35.755,97	-30.646,68	-25.014,69	-18.796,79	-11.921,69	-4.308,96	4.132,10	13.503,83	23.921,60		
6,00%	-47.744,94	-43.102,31	-37.993,02	-32.361,03	-26.143,13	-19.268,03	-11.655,30	-3.214,24	6.157,49	16.575,26		
7,00%	-55.879,46	-51.236,83	-46.127,54	-40.495,56	-34.277,66	-27.402,56	-19.789,83	-11.348,76	-1.977,04	8.440,73		
8,00%	-64.899,10	-60.256,47	-55.147,18	-49.515,20	-43.297,30	-36.422,19	-28.809,47	-20.368,40	-10.996,68	-576,90		
9,00%	-74.913,18	-70.270,55	-65.161,26	-59.529,28	-53.311,38	-46.436,28	-38.823,55	-30.382,48	-21.010,76	-10.592,99		
10,00%	-86.045,02	-81.402,38	-76.293,10	-70.661,11	-64.443,21	-57.568,11	-49.955,38	-41.514,32	-32.142,59	-21.724,82		

### Análise de VPL - Cenário 4B1

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Taxa de crescimento	0,00%	Investimento	-13.878,33									
Taxa de crescimento	0,00%	Receita	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
Taxa Selic	14,15%	Custo	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00	-7.981,00
		Valor Residual										
		Fluxo de Caixa	-11.143,34	2.735,00	2.735,00	2.735,00	2.735,00	2.735,00	2.735,00	2.735,00	2.735,00	2.735,00
VPL	5.970,56											
VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO												
	5.970,56	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
1,00%	7.049,06		11.691,69	16.800,98	22.432,97	28.650,86	35.525,97	43.138,70	51.579,76	60.951,48	71.369,26	
2,00%	3.591,35		8.233,98	13.343,27	18.975,25	25.193,15	32.068,25	39.680,98	48.122,05	57.493,77	67.911,54	
3,00%	-213,92		4.428,71	9.538,00	15.169,99	21.387,88	28.262,99	35.875,72	44.316,78	53.688,51	64.106,28	
4,00%	-4.408,48		234,15	5.343,44	10.975,43	17.193,33	24.068,43	31.681,16	40.122,22	49.493,95	59.911,72	
5,00%	-9.039,41		-4.396,78	712,51	6.344,50	12.562,40	19.437,50	27.050,23	35.491,29	44.863,02	55.280,79	
6,00%	-14.159,81		-9.517,18	-4.407,89	1.224,10	7.441,99	14.317,10	21.929,83	30.370,89	39.742,61	50.160,39	
7,00%	-19.829,57		-13.186,94	-10.077,66	-4.445,67	1.772,23	8.647,33	16.260,06	24.701,13	34.072,85	44.490,62	
8,00%	-26.116,26		-21.473,63	-16.364,35	-10.732,36	-4.514,46	2.360,64	9.973,37	18.414,44	27.786,16	38.203,93	
9,00%	-33.095,08		-28.453,45	-23.344,16	-17.712,18	-11.494,28	-4.619,18	2.993,55	11.434,62	20.806,34	31.224,12	
10,00%	-40.854,97		-36.212,34	-31.103,05	-25.471,07	-19.253,17	-12.378,07	-4.765,34	3.675,73	13.047,45	23.465,22	

### Análise de VPL - Cenário 4B4

		ANO										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9...	20
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa de crescimento	0,00%											
Taxa Selic	14,15%											
<b>VPL</b>	<b>137,83</b>											
<b>Investimento</b>		<b>-13.878,33</b>										
<b>Receita</b>		10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00	10.716,00
<b>Custo</b>		-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97	-8.860,97
<b>Valor Residual</b>												
<b>Fluxo de Caixa</b>		<b>-12.023,30</b>	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03	1.855,03
<b>VALOR DO VPL A PARTIR DA VARIAÇÃO DAS TAXAS DE CRESCIMENTO DE RECEITA E CUSTO</b>												
	137,83	1,00%	2,00%	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%	8,00%	9,00%	10,00%	
	1,00%	869,33	5.511,97	10.621,25	16.253,24	22.471,14	29.346,24	36.958,97	45.400,04	54.771,76	65.189,53	
	2,00%	-2.969,62	1.673,01	6.782,30	12.414,29	18.632,18	25.507,29	33.120,02	41.561,08	50.932,81	61.350,58	
	3,00%	-7.194,44	-2.551,81	2.557,48	8.189,46	14.407,36	21.282,46	28.895,19	37.336,26	46.707,98	57.125,75	
	4,00%	-11.851,48	-7.208,85	-2.099,57	3.532,42	9.750,32	16.625,42	24.238,15	32.679,22	42.050,94	52.468,71	
	5,00%	-16.993,01	-12.350,38	-7.241,09	-1.609,10	4.608,79	11.483,90	19.096,63	27.537,69	36.909,41	47.327,19	
	6,00%	-22.677,97	-18.035,34	-12.926,05	-7.294,07	-1.076,17	5.798,93	13.411,66	21.852,73	31.224,45	41.642,22	
	7,00%	-28.972,87	-24.330,24	-19.220,95	-13.588,97	-7.371,07	-495,97	7.116,76	15.557,83	24.929,55	35.347,32	
	8,00%	-35.952,72	-31.310,09	-26.200,80	-20.568,81	-14.390,92	-7.475,81	136,92	8.577,98	17.949,71	28.367,48	
	9,00%	-43.702,11	-39.059,48	-33.950,19	-28.318,21	-22.100,31	-15.225,21	-7.812,48	828,59	10.200,31	20.618,08	
	10,00%	-52.316,48	-47.673,85	-42.564,56	-36.932,57	-30.714,68	-23.839,57	-16.226,85	-7.785,78	1.585,94	12.003,72	