

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE LODO GERADO EM  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE  
SÃO JOSÉ DO RIO PRETO/SP**

**BÁRBARA GARCIA DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cali Laguna Achon

São Carlos

2026

Bárbara Garcia de, Souza

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de lodo gerado em  
estação de tratamento de esgoto no município de São  
José do Rio Preto - SP / Souza Bárbara Garcia de -- 2026.  
117f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São  
Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Cali Laguna Achon

Banca Examinadora: Cristiane Bueno, Fabiana Alves  
Fiore Pinto

Bibliografia

1. Lodo. 2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). 3. Estação  
de tratamento. I. Bárbara Garcia de, Souza. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

## COMPROVANTE DE DEFESA

A Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, da Universidade Federal de São Carlos, declara, por meio deste, a realização da seguinte Defesa de Mestrado:

**Candidata: Bárbara Garcia de Souza**

**Título do Trabalho: AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV) DE LODO DE ETE EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO/SP**

**Dia: 09/02/2026**

**Horário: 14:00**

**Local: Sala 3 - DECiv**

### Banca Examinadora:

Cali Laguna Achon, presidente titular interno, UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, presencialmente, Aprovou o candidato

Cristiane Bueno, membro titular interno, UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, presencialmente, Aprovou o candidato

Fabiana Alves Fiore Pinto, membro titular externo, UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, a distância, Aprovou o candidato

**Resultado Final: Aprovado**

**Título Definitivo do Trabalho: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE LODO GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO/SP**

**Obs: o resultado da defesa ainda não foi homologado pela CPG do PPG.**

**O(a) candidato(a) só fará jus ao título de mestre(a)/doutor(a), quando o diploma estiver em fase de emissão. O documento apto para comprovar a obtenção de título acadêmico é o Diploma ou o Certificado de Conclusão de Curso (enquanto o diploma estiver em fase de emissão).**

**ATENÇÃO** Este é um documento oficial da Pró-Reitoria de pós-graduação da UFSCar e está isento de carimbo e assinatura.

Código: <b>38S2-R8X0-11E4-FRC3</b>	Documento emitido às 16:08 horas do dia 10/02/2026 (hora e data de Brasília) A autenticidade pode ser verificada em: <a href="http://propgweb.ufscar.br/ProPGWeb/ValidarDocumento.do">http://propgweb.ufscar.br/ProPGWeb/ValidarDocumento.do</a>
---------------------------------------	---

*Dedico este trabalho a todos aqueles que, por meio da ciência, da gestão pública e do compromisso social, lutam pelo saneamento básico e pela redução dos impactos ambientais.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, que me sustentou nos dias mais difíceis e me deu força e coragem para enfrentar os desafios.

À Nossa Senhora, que ouviu minhas orações e me concedeu paz e conforto ao longo dessa caminhada.

Aos meus pais, Cláudia e Marcos, e à minha irmã, Paloma, que sempre me apoiaram e vibraram com as minhas conquistas.

Aos amigos que a pós-graduação me proporcionou, Luis, Tayara e Maria Heloísa, que tornaram meus dias de estudo mais leves, tanto nas aulas quanto nas viagens para São Carlos – SP.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cali, que não mediu esforços para me orientar e apoiar ao longo desta etapa do mestrado.

Aos meus chefes e amigos da ID4 Arquitetura e Meio Ambiente, pelo apoio e compreensão durante essa fase do mestrado.

Aos professores e a toda a equipe do PPGEU, pelo conhecimento compartilhado e pela dedicação ao ensino.

Ao SeMAE e à equipe técnica das Estações de Tratamento de Água e de Esgoto, pelo fornecimento dos dados que possibilitaram o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha amiga Carla, pelo auxílio na requisição dos dados.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa CAPES DS e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

*“Eu sei o preço do sucesso: dedicação,  
trabalho duro e uma incessante devoção  
às coisas que você quer ver acontecer.”*

*Frank Lloyd Wright*

## RESUMO

As atividades de abastecimento de água e tratamento de esgoto exercem papel essencial na promoção da saúde pública e na preservação ambiental. No entanto, assim como outros processos industriais, os sistemas de saneamento geram diferentes tipos de resíduos, sendo o lodo o principal subproduto tanto das Estações de Tratamento de Água (ETAs) quanto das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). Apesar do elevado teor de umidade, esses lodos são classificados como resíduos sólidos e devem atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010). Esta pesquisa tem como objetivo analisar os potenciais impactos ambientais associados ao processo de geração do lodo pelos sistemas de tratamento no município de São José do Rio Preto/SP com base na Avaliação do Ciclo de Vida. O procedimento metodológico está estruturado em quatro fases, sendo elas: (i) revisão bibliográfica, análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura; (ii) levantamento e sistematização de dados primários referentes aos processos de tratamento de água e esgoto do município de São José do Rio Preto/SP para construção do Inventário do Ciclo de Vida (ICV); (iii) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e (iv) interpretação dos resultados. A ACV foi conduzida conforme as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, considerando como unidade funcional 1 kg de lodo desaguado. A AICV foi realizada com o método ReCiPe 2016, na abordagem *midpoint* (H), utilizando o *software OpenLCA*, e os resultados foram analisados por meio da interpretação e da análise de contribuição dos processos para as categorias de impacto Mudanças Climáticas, Escassez de Recursos Fósseis, Ecotoxicidade Terrestre, Toxicidade Humana não carcinogênica e Eutrofização de Água Doce. Os resultados indicam que os impactos ambientais estão predominantemente associados às etapas operacionais de tratamento. A análise de contribuição evidenciou o consumo de energia elétrica como o principal *hotspot* ambiental do sistema. Esses resultados demonstram o potencial da ACV como ferramenta de apoio à gestão ambiental dos resíduos do saneamento, ao permitir a identificação de processos críticos e oportunidades de melhoria.

**Palavras-chave:** Lodo; Estação de Tratamento de Água; Estação de Tratamento de Esgoto; Avaliação do Ciclo de Vida; Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

## **ABSTRACT**

Water supply and wastewater treatment activities play an essential role in promoting public health and environmental protection. However, like other industrial processes, sanitation systems generate different types of waste, with sludge being the main by-product of both Water Treatment Plants (WTPs) and Wastewater Treatment Plants (WWTPs). Despite their high moisture content, these sludges are classified as solid waste and must comply with the guidelines of the Brazilian National Solid Waste Policy (PNRS – Law No. 12,305/2010). This research aims to analyze the potential environmental impacts associated with sludge generated by treatment systems in the municipality of São José do Rio Preto/SP, based on Life Cycle Assessment (LCA). The methodological procedure is structured into four phases: (i) bibliographic review, bibliometric analysis, and systematic literature review; (ii) collection and systematization of primary data related to water and wastewater treatment processes in the municipality of São José do Rio Preto/SP for the construction of the Life Cycle Inventory (LCI); (iii) Life Cycle Impact Assessment (LCIA); and (iv) interpretation of the results. The LCA was conducted in accordance with ABNT NBR ISO 14040 and 14044 standards, considering 1 kg of dewatered sludge as the functional unit. The LCIA was performed using the ReCiPe 2016 method, midpoint (H) approach, with the support of the OpenLCA software, and the results were analyzed through interpretation and contribution analysis of processes for the impact categories Climate Change, Fossil Resource Scarcity, Terrestrial Ecotoxicity, Human Toxicity (non-carcinogenic), and Freshwater Eutrophication. The results indicate that the environmental impacts of the treatment system are predominantly associated with operational stages. Contribution analysis identified electricity consumption as the main environmental hotspot of the system. These findings demonstrate the potential of LCA as a decision-support tool for the environmental management of sanitation residues by enabling the identification of critical processes and opportunities for improvement.

**Keywords:** Sludge; Water Treatment Plant; Wastewater Treatment Plant; Life Cycle Assessment; Life Cycle Impact Assessment.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Tecnologias de tratamento de água com indicação dos pontos de geração de resíduos.....	25
<b>Figura 2</b> - Esquema sobre as tecnologias de tratamento de esgoto.....	27
<b>Figura 3</b> - Representação e descrição das etapas do tratamento do lodo de ETE no que se refere à remoção de água. ....	29
<b>Figura 4</b> - Métodos de desaguamento de lodo de ETE. ....	30
<b>Figura 5</b> - Métodos de secagem de lodo de ETE. ....	31
<b>Figura 6</b> - Estrutura metodológica da ACV. ....	32
<b>Figura 7</b> - Ciclo de vida do sistema de tratamento de água e esgoto.....	33
<b>Figura 8</b> - Elementos da fase de AICV. ....	38
<b>Figura 9</b> - Metodologia adotada para a revisão bibliográfica das fases 1 e 2..	50
<b>Figura 10</b> - Total de publicações em artigos de 2010 a 2024.....	52
<b>Figura 11</b> – Países que mais publicam artigos sobre o tema.....	53
<b>Figura 12</b> - Mapa de co-ocorrência de palavras-chave. ....	54
<b>Figura 13</b> - Mapa de relação entre países.....	55
<b>Figura 14</b> - Gráfico representando os métodos de avaliação de impacto utilizados nas pesquisas dos 40 artigos da revisão sistemática.....	57
<b>Figura 15</b> - Gráfico representando o local de extração dos dados do inventário do ciclo de vida utilizados nas pesquisas dos 40 artigos da revisão sistemática .....	58
<b>Figura 16</b> - Gráfico representando o software utilizado para modelagem da AICV nas pesquisas dos 40 artigos da revisão sistemática .....	58
<b>Figura 17</b> – Estrutura metodológica desta pesquisa. ....	41
<b>Figura 18</b> - Localização do município de São José do Rio Preto/SP.....	42
<b>Figura 19</b> - Limite do sistema .....	44
<b>Figura 20</b> - Localização ETA Palácio das Águas.....	60
<b>Figura 21</b> - ETA Palácio das Águas após o retrofit.....	61
<b>Figura 22</b> - Fluxograma do processo de tratamento de água na ETA.....	62
<b>Figura 23</b> - Adição de cloreto férrico na etapa de tratamento.....	63
<b>Figura 24</b> - Etapa de filtração no tratamento da água. ....	64
<b>Figura 25</b> - Lodo e água de lavagem dos filtros (ALAF). ....	65
<b>Figura 26</b> - Ciclo de vida do tratamento de água em São José do Rio Preto..	67

<b>Figura 27</b> - Localização da ETE de São José do Rio Preto.....	68
<b>Figura 28</b> - Estação elevatória de esgoto bruto.....	69
<b>Figura 29</b> - Resíduos do gradeamento grosso depositado em caçamba e destinado para aterro sanitário.....	70
<b>Figura 30</b> - Resíduos do gradeamento fino, com lâminas de 3mm de espaçamento.....	70
<b>Figura 31</b> - Sistema lateral de remoção do lodo do Reator UASB.....	71
<b>Figura 32</b> - Sistema de tratamento do lodo na ETE de São José do Rio Preto. ....	72
<b>Figura 33</b> - Galpão existe de secagem do lodo inativo.....	73
<b>Figura 34</b> - Lodo removido do reator UASB.....	73
<b>Figura 35</b> - Lodo desaguado após processo mecânico na centrífuga. ....	74
<b>Figura 36</b> - Efluente tratado.....	74
<b>Figura 37</b> - Ciclo de vida do tratamento de esgoto na ETE.....	78
<b>Figura 38</b> – Entradas e saídas do Processo 1 - Captação e tratamento de água modelado no <i>software OpenLCA</i> . ....	86
<b>Figura 39</b> - Entradas e saídas do Processo 2 - Tratamento de esgoto modelado no <i>software OpenLCA</i> . ....	87
<b>Figura 40</b> - Entradas e saídas do Processo 3 - Desaguamento do lodo modelado no <i>software OpenLCA</i> . ....	87
<b>Figura 41</b> - Entradas e saídas do Processo 4 - Transporte e destinação final do lodo em aterro modelado no <i>software OpenLCA</i> . ....	88
<b>Figura 42</b> - Tabela de propriedades do cálculo para avaliação de impacto pelo método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H) no <i>software OpenLCA</i> . ....	89
<b>Figura 43</b> - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Mudanças Climáticas com aplicação do método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H) no <i>software OpenLCA</i> . ....	92
<b>Figura 44</b> - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Eutrofização de Água Doce com aplicação do método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H) no <i>software OpenLCA</i> .....	94
<b>Figura 45</b> - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Toxicidade Humana não carcinogênica com aplicação do método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H) no <i>software OpenLCA</i> . ....	94

<b>Figura 46</b> - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre com aplicação do método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H) no <i>software OpenLCA</i> .....	95
<b>Figura 47</b> - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Escassez de Recursos Fósseis com aplicação do método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> (H) no <i>software OpenLCA</i> .....	96
<b>Figura 48</b> - Formulário de requisição de dados para a ETA de São José do Rio Preto.....	110
<b>Figura 49</b> - Formulário de requisição de dados para a ETE de São José do Rio Preto.....	111

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> - Relação de dados de entradas e saídas dos processos de tratamento e destinação do lodo para a fase de ICV .....	54
<b>Tabela 02</b> – dados quantitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 01) .....	62
<b>Tabela 03</b> – dados qualitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 01) .....	63
<b>Tabela 04</b> – dados quantitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 02) .....	72
<b>Tabela 05</b> – dados qualitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 02) .....	72
<b>Tabela 06</b> – dados quantitativos do teor de sólidos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 02) .....	73
<b>Tabela 07</b> – Inventário do processo 1 (captação e tratamento de água) .....	77
<b>Tabela 08</b> – Inventário do processo 2 (Tratamento de esgoto) .....	80
<b>Tabela 09</b> – Inventário do processo 3 (desaguamento do lodo) .....	82
<b>Tabela 10</b> – Inventário do processo 4 (transporte e destinação do lodo em aterro sanitário) .....	82

## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 01</b> – Relação de dados de entradas e saídas dos processos de tratamento e destinação do lodo para a fase de ICV .....	54
<b>Quadro 02</b> – Artigos extraídos para revisão sistemática .....	104
<b>Quadro 03</b> – Registro das produções científicas .....	97

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ALAF	Água de Lavagem de Filtros
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICV	Inventários de Ciclo de Vida
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SEMAE	Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto
SeMAE	Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto
STED	Sistemas de Tratamento de Esgoto Doméstico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
2. OBJETIVOS .....	19
2.1. Objetivo Geral.....	19
2.2. Objetivo Específico .....	19
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	20
3.1. Os resíduos de saneamento.....	20
3.1.1. Sistemas de tratamento de água .....	22
3.1.2. Sistema de tratamento de esgoto.....	25
3.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) .....	31
3.2.1. Estrutura metodológica da ACV .....	34
3.2.1.1. Definição de objetivo e escopo .....	34
3.2.1.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) .....	36
3.2.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida – AICV .....	37
3.2.1.4. Interpretação do ciclo de vida .....	39
4. METODOLOGIA .....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
5.1. Análise bibliométrica e Revisão sistemática sobre os métodos de análise de impactos ambientais mais utilizados no âmbito do saneamento .....	49
5.1.1.1. Análise exploratória e bibliométrica.....	51
5.1.1.2. Revisão sistemática dos métodos de avaliação de impacto .....	56
5.2. ETA Palácio das Águas – São José do Rio Preto/SP .....	60
5.2.1. Fluxograma do sistema de tratamento de água .....	66
5.3. ETE – São José do Rio Preto/SP .....	68
5.3.1. Fluxograma do sistema de tratamento de esgoto.....	77
5.4. Inventário do Ciclo de Vida (ICV) .....	78
5.4.1. Modelagem dos fluxos e processos do ICV.....	86
5.5. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	88
5.5.1. Análise de contribuição dos processos.....	92
6. CONCLUSÕES .....	98
7. REGISTRO DAS PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS .....	99
8. REFERÊNCIAS.....	101
APÊNDICE 01 .....	110
APÊNDICE 02.....	111
APÊNDICE 03.....	112

## 1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico desempenha papel essencial na proteção da saúde pública e na preservação ambiental, sendo instituído a Política Nacional de Saneamento Básico pela Lei Federal nº 11.445, de 2007, que contempla os serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais urbanas. No mesmo âmbito de legislação federal, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, em sua classificação quanto a origem, define que os resíduos de saneamento básico são os gerados nos quatro eixos mencionados acima, exceto os resíduos sólidos urbanos (resíduos domiciliares e de limpeza urbana). Desta forma, na classificação quanto a origem, os resíduos sólidos de saneamento são categorizados como os provenientes dos serviços de água, esgotamento sanitário e drenagem urbana.

Além da classificação quanto a origem, a PNRS, estabelece o objetivo da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, ou seja, resíduos sólidos que estão esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis (Brasil, 2010a).

Os Sistemas de Tratamento de Esgoto Doméstico (STED) são fundamentais para a redução de impactos associados à depleção de oxigênio, à eutrofização, à introdução de substâncias tóxicas nos corpos hídricos e aos riscos à saúde humana, o que evidencia sua importância ambiental. No entanto, esses sistemas também podem ocasionar impactos negativos, em razão do consumo de energia, do uso de insumos químicos, das emissões atmosféricas e da geração de resíduos sólidos, conhecido como lodo. Dessa forma, a escolha do tipo de tratamento mais adequado representa um desafio, pois envolve diversas variáveis que influenciam sua sustentabilidade ambiental, além de fatores relacionados aos custos e à tecnologia disponível (Gutierrez, 2014).

De modo semelhante, nas Estações de Tratamento de Água (ETA) de sistema convencional de ciclo completo, a frequência de remoção de lodo nos decantadores pode variar, dependendo das especificidades local e gerar acúmulo de lodo com elevada concentração de contaminantes orgânicos e

inorgânicos, além de dificultar a remoção e disposição final. Desta forma, a remoção de lodo pode ser considerada um dos principais problemas de gestão desse resíduo, pois influencia diretamente em sua quantidade e qualidade (Achon, 2008). Apesar disso, há escassez de informações sobre esses resíduos, especialmente quanto à sua composição, a qual é essencial para avaliar riscos ambientais e à saúde humana, bem como para viabilizar alternativas de uso benéfico (Fiore *et al.*, 2020).

Apesar do alto teor de umidade, os lodos provenientes dos sistemas de saneamento são considerados resíduos sólidos. Dessa forma o seu descarte em corpos d'água, prática comum em muitas estações de tratamento, não é considerado uma destinação ambientalmente adequada, segundo a PNRS e constitui como crime ambiental nos termos da Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais), em seu art. 54, causar poluição de qualquer natureza em níveis que resultem ou possam resultar em danos à saúde humana, bem como provocar a mortandade de animais ou a destruição significativa da flora. Isso torna a gestão desses resíduos um desafio para o setor de saneamento (Achon; Barroso; Cordeiro, 2013).

A crescente demanda por água potável reflete o aumento populacional e a ampliação do acesso aos serviços de saneamento. Paralelamente, os corpos d'água enfrentam um processo histórico de degradação, que requer a adoção de técnicas cada vez mais sofisticadas para seu tratamento. Nesse contexto, observa-se uma tendência de expansão dos processos de tratamento de água e esgoto, o que resulta no aumento da geração e na piora da qualidade dos lodos gerados pelas ETAs e ETEs (Urban; Isaac; Morita, 2019).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é reconhecida como uma metodologia capaz de compilar e avaliar as entradas, saídas e os potenciais impactos ambientais associados a produtos ou sistemas ao longo de todo o seu ciclo de vida (ABNT, 2009a), sendo aplicada também na análise de resíduos provenientes do saneamento (Gutierrez, 2014).

A aplicação da ACV requer a utilização de bancos de dados compostos por informações ambientais, organizadas sob a forma de Inventários do Ciclo de Vida (ICV). Esses inventários reúnem dados sobre o consumo de energia, emissões atmosféricas, geração de efluentes líquidos e resíduos sólidos, abrangendo tanto a produção de bens e a oferta de recursos energéticos quanto

a prestação de serviços (Gutierrez, 2014). Assim, para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos por meio da ACV, é essencial que os ICV utilizados sejam compostos por informações representativas da realidade regional (ABNT, 2009a).

Para transformar os dados numéricos do inventário em resultados com significado ambiental, é usual empregar métodos de avaliação de impacto. Esses métodos reúnem informações ambientais relacionadas a uma ampla variedade de substâncias e recursos, aplicando etapas como caracterização, normalização e ponderação com base em fatores previamente estabelecidos. Cada método adota critérios próprios para essas etapas, o que resulta em variações nos resultados conforme a abordagem utilizada. Essa fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) tem o objetivo de avaliar o sistema de produto sob a perspectiva ambiental, utilizando categorias de impacto e indicadores correspondentes às categorias, com base nos resultados obtidos no ICV (ABNT, 2009a).

As normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) estabelecem a estrutura geral para a condução da ACV e da AICV, definindo suas principais fases, mas sem detalhar os métodos específicos a serem aplicados. No caso da AICV, a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) determina que ela deve incluir obrigatoriamente a seleção das categorias de impacto, a classificação dos dados do inventário conforme sua relevância para essas categorias e a caracterização, que consiste na valoração dos aspectos ambientais a partir de sua magnitude relativa em relação aos impactos considerados.

Em São José do Rio Preto, município de porte médio situado no interior do estado de São Paulo, os serviços de abastecimento de água e de coleta, afastamento e tratamento de esgoto são de responsabilidade do Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SeMAE) e segundo dados da Conjuntura Econômica de 2023, 100% da população no município é atendida pelos serviços de saneamento.

O sistema de captação de água no município é feito de três formas: aproximadamente 20% da água é captada superficialmente na represa municipal, 23% provêm de captação subterrânea do Aquífero Guarani e os 57% restantes são do Aquífero Bauru (Conjuntura Econômica, 2024). A água

proveniente da represa é tratada na ETA por meio de uma sequência de processos que inclui oxidação, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, controle de pH e fluoretação. Já a água subterrânea, por apresentar menor vulnerabilidade à contaminação, recebe apenas cloração e fluoretação antes da distribuição. O lodo gerado durante o processo de tratamento na ETA é conduzido por meio de interceptores até a ETE.

No que se refere ao esgotamento sanitário, ETE de São José do Rio Preto, em operação desde 2008, realiza o tratamento do esgoto coletado a partir das etapas de gradeamento grosseiro e fino, desarenação e encaminhamento ao reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), responsável pela remoção de cerca de 70% da matéria orgânica, o que torna desnecessária a etapa de tratamento primário. Em seguida, o efluente passa por tanque de aeração, decantação, cloração e, por fim, é lançado no corpo hídrico como efluente tratado. Os resíduos sólidos gerados ao longo do processo são desaguados mecanicamente com o uso de centrífugas e dispostos em aterro sanitário.

Diante desse cenário, diversos estudos ao redor do mundo têm buscado alternativas para a melhoria da gestão ambiental e o uso benéfico dos lodos gerados em ETAs e ETEs. No entanto, no contexto brasileiro, a aplicação em escala real ainda é limitada, em grande parte devido ao desconhecimento sobre o estado da arte relacionado ao tema (Urban; Isaac; Morita, 2019).

Nesse sentido, o presente trabalho propõe-se a contribuir para o aprimoramento da sustentabilidade ambiental dos sistemas de tratamento de água e esgoto no município de São José do Rio Preto, por meio da disponibilização de informações que apoiem a análise e o gerenciamento dos resíduos integrados desses sistemas, com base nos princípios da ACV.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral analisar os potenciais impactos ambientais associados ao processo de geração do lodo pelos sistemas de tratamento de água e esgoto no município de São José do Rio Preto/SP.

### **2.2. Objetivo Específico**

- Estruturar o ICV referente ao processo de geração do lodo de sistema de tratamento de água e esgoto utilizando o *software OpenLCA* e a base de dados ELCD;
- Avaliar os potenciais impactos ambientais associados à geração do lodo por meio da aplicação do método ReCiPe 2016 (*midpoint*) e sua contribuição por processos;
- Identificar as etapas e processos que mais contribuem para os impactos ambientais (*hotspots* ambientais) na geração do lodo;
- Identificar melhorias ambientais para a mitigação dos potenciais impactos ambientais.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

Os referenciais teóricos apresentados nesta pesquisa proporcionam o conhecimento sobre a problemática dos resíduos sólidos gerados nos sistemas de tratamento de água e esgoto, bem como sobre a aplicação da metodologia de ACV na análise de seus potenciais impactos ambientais.

#### **3.1. Os resíduos de saneamento**

Os resíduos do saneamento, são subprodutos gerados a partir dos serviços de tratamento de água e esgoto nas estações, sendo esta, a sua classificação quanto à sua origem definida pela PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010.

As atividades de abastecimento de água e esgoto desempenham um papel fundamental na promoção da saúde pública e na preservação ambiental. No entanto, como todo processo industrial, os sistemas de saneamento resultam na geração de diferentes tipos de resíduos, sendo o lodo o principal subproduto tanto das ETAs quanto das ETEs. Esses resíduos apresentam composição variada, em razão das distintas etapas físico-químicas para tratamento de água e biológicas para tratamento do esgoto. A definição de alternativas economicamente viáveis e ambientalmente adequadas para sua destinação final ainda representa um desafio relevante para a gestão dos resíduos do saneamento (Babatunde; Zhao, 2007).

Segundo Fiore *et al.* (2020), no Brasil, as ETAs costumam empregar coagulantes à base de óxidos de ferro ou de alumínio, o que resulta na geração de lodos comumente denominados lodo férrico e lodo de alumínio. De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2012) e a ABNT NBR 10.004 (2024), esse tipo de resíduo é classificado como não perigoso e seu gerenciamento deve ser responsabilidade dos próprios geradores, em conformidade com as diretrizes da PNRS para minimização da geração, recuperação e disposição final apenas das frações não aproveitáveis (Brasil, 2010a). A classificação de resíduos sólidos quanto à sua periculosidade segue os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10.004, norma técnica brasileira que define parâmetros para diferenciar resíduos perigosos de não

perigosos. A caracterização de um resíduo requer a escolha criteriosa dos constituintes a serem avaliados, levando em consideração as matérias-primas e os insumos empregados, além das particularidades do processo de origem (ABNT, 2024).

Os lodos resultantes do tratamento de esgoto apresentam maior concentração de matéria orgânica e maior potencial de contaminação por patógenos, poluentes orgânicos tóxicos e metais pesados. Por esse motivo, qualquer forma de aproveitamento desse material deve ser cuidadosamente analisada, a fim de evitar riscos ambientais e à saúde pública. As suas características variam de acordo com a composição das águas residuárias e com os processos empregados no tratamento das fases líquida e sólida. Essas propriedades podem sofrer alterações ao longo do tempo, seja de forma anual, sazonal ou até diária, em razão das oscilações nas características do esgoto sanitário (Urban; Isaac; Morita, 2018).

Amaral, Aisse e Possetti (2019) destacam que as formas mais comuns de destinação do lodo de esgoto são a disposição final em aterros sanitários e a aplicação agrícola. Por se tratar de um resíduo sólido, o lodo só deveria ser disposto em aterros sanitários após esgotadas todas as alternativas de aproveitamento, conforme estabelece a PNRS (Brasil, 2010a). No entanto, na prática, esse resíduo costuma ser apenas adensado e estabilizado, com o objetivo de reduzir seu volume, teor de matéria orgânica e a carga de microrganismos patogênicos, e, passa por um processo de desaguoamento para facilitar o transporte. Apesar disso, é frequentemente disposto em aterros sanitários como rejeito, sem que sejam consideradas formas de recuperação, reuso ou reciclagem, em desacordo com os princípios da referida política (Silva; Achon, 2019).

Já na aplicação agrícola, técnica adotada em diferentes proporções ao redor do mundo, representa uma alternativa viável para o aproveitamento do lodo gerado nas ETEs (Amaral; Aisse; Possetti, 2019). Segundo Gonçalves (1999), a aplicação do lodo de ETEs na agricultura surge como uma alternativa viável e promissora, trazendo benefícios tanto ambientais quanto econômicos. Essa prática pode contribuir significativamente para a recuperação de áreas degradadas, o reflorestamento e a melhoria das propriedades do solo, especialmente em regiões de agricultura intensiva. Silva e Achon (2019) afirmam

que o reaproveitamento energético e o reuso na agricultura são métodos amplamente empregados em outros países, porém no Brasil ainda são pouco utilizados. No contexto brasileiro, essa prática passou a contar com um marco regulatório mais atualizado a partir da publicação da Resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece critérios e procedimentos para o uso de lodo de esgoto em solos, visando à proteção da saúde humana e do meio ambiente (Brasil, 2020).

Apesar de a gestão do lodo gerado em ETA e ETE ser um processo complexo e representar entre 20% e 60% dos custos operacionais dessas unidades, Andreoli e Pinto (2001) afirmam que o planejamento e a execução de sua destinação final ainda são frequentemente negligenciados em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, e que os projetos de estações de tratamento simplesmente ignoram a forma de destino desse material.

A definição das formas de manejo, tratamento e destinação do lodo constitui exigência legal vinculada ao processo de licenciamento ambiental, sendo de responsabilidade do órgão ambiental licenciador exigir sua previsão e comprovação como condição para a implantação e operação das unidades.

Desde a promulgação da Resolução CONAMA nº 237/1997, os empreendimentos e atividades potencialmente poluidores passaram a estar sujeitos ao licenciamento ambiental, incluindo os sistemas de tratamento de água e de esgoto. Assim, as ETAs e as ETEs devem atender às exigências dos órgãos ambientais quanto ao controle e à mitigação de seus impactos (Brasil, 1997). Posteriormente, a Lei nº 15.190/2025 reafirma e consolida o licenciamento ambiental como instrumento obrigatório de controle, mantendo a exigência para tais atividades e abrangendo, de forma expressa, a gestão de resíduos e subprodutos gerados pelos empreendimentos licenciados, como é o caso das ETAs e ETEs (Brasil, 2025).

### **3.1.1. Sistemas de tratamento de água**

O principal objetivo do tratamento de água é garantir o fornecimento de água potável com qualidade adequada para o consumo, com a remoção de microrganismos, matéria orgânica e substâncias tóxicas, além da manutenção das características estéticas da água e da proteção da rede de distribuição. Os

sistemas tradicionais de tratamento consistem principalmente em processos físico-químicos e químicos, como coagulação-floculação, decantação, filtração granular e desinfecção química (Bonton *et al.*, 2011).

Segundo Sabogal-Paz (2007), as ETAs têm como finalidade eliminar os riscos associados às águas provenientes das fontes de abastecimento, por meio da aplicação conjunta de processos e operações de tratamento. Os sistemas devem atender a critérios amplos de qualidade, conforme os padrões e exigências de legislação vigente. Nesse contexto, os gestores das unidades precisam estar atentos a uma série de fatores, considerando a influência de cada etapa do sistema, antes, durante e após o processo de tratamento (Achon, 2008).

As principais tecnologias utilizadas para a potabilização da água incluem os sistemas de ciclo completo, a filtração direta descendente, a filtração direta ascendente, a dupla filtração, a floto-filtração e a filtração em múltiplas etapas (Di Bernardo e Sabogal-Paz, 2008). Bonton *et al.* (2011) destacam que, geralmente, a escolha do sistema de tratamento de água é orientada, prioritariamente, por restrições técnicas e econômicas, e Achon (2008) afirma que o meio ambiente e a comunidade precisam ser considerados na escolha da tecnologia para tratamento, para obter a sustentabilidade.

Segundo Achon (2008), além das tecnologias apresentadas na figura 01, também podem ser empregadas técnicas avançadas para a remoção de contaminantes específicos, como a desmineralização da água com alto teor de sais dissolvidos, por meio de eletrólise ou osmose reversa, e a remoção de certos poluentes por processos como adsorção, troca iônica ou ultrafiltração. Nesse contexto, o sistema de tratamento de água destinado ao abastecimento público envolve etapas que vão desde a captação no manancial até o tratamento dos resíduos gerados na ETA.

Vários autores destacam que o sistema de tratamento de água mais utilizado no Brasil é o convencional ou de ciclo completo (Reali, 1999; Tsutiya e Hirata, 2001; Achon, 2008; Di Bernardo e Sabogal-Paz, 2008). Desta forma, Achon (2008) descreve em sua pesquisa, todas as etapas para tratamento desta tecnologia em uma ETA:

No tratamento de ciclo completo, denominado convencional, a água bruta é coagulada com um sal de alumínio ou ferro no

mecanismo da varredura, no qual ocorre formação predominante de precipitados do metal base, onde são retiradas as impurezas. Esse processo ocorre na unidade de mistura rápida, que pode ser hidráulica ou mecanizada, dependendo da vazão a ser tratada, da variação da qualidade da água bruta e, principalmente das condições disponíveis para operação e manutenção.

A seguir, a água coagulada é encaminhada para os floculadores, que são unidades de mistura lenta, que também podem ser hidráulicas ou mecanizadas, onde ocorre a formação de flocos, devido a agitação lenta durante um período até que os flocos tenham tamanho suficiente e massa específica para serem removidos por sedimentação ou flotação.

Dependendo da qualidade da água bruta, pode haver necessidade de variação da intensidade de agitação nos floculadores, para que se recomenda a adoção de unidades mecanizadas.

Os decantadores podem ser convencionais, compostos por grandes tanques de escoamento horizontal ou vertical ou de alta taxa, onde são empregados módulos de plástico ou placas planas paralelas.

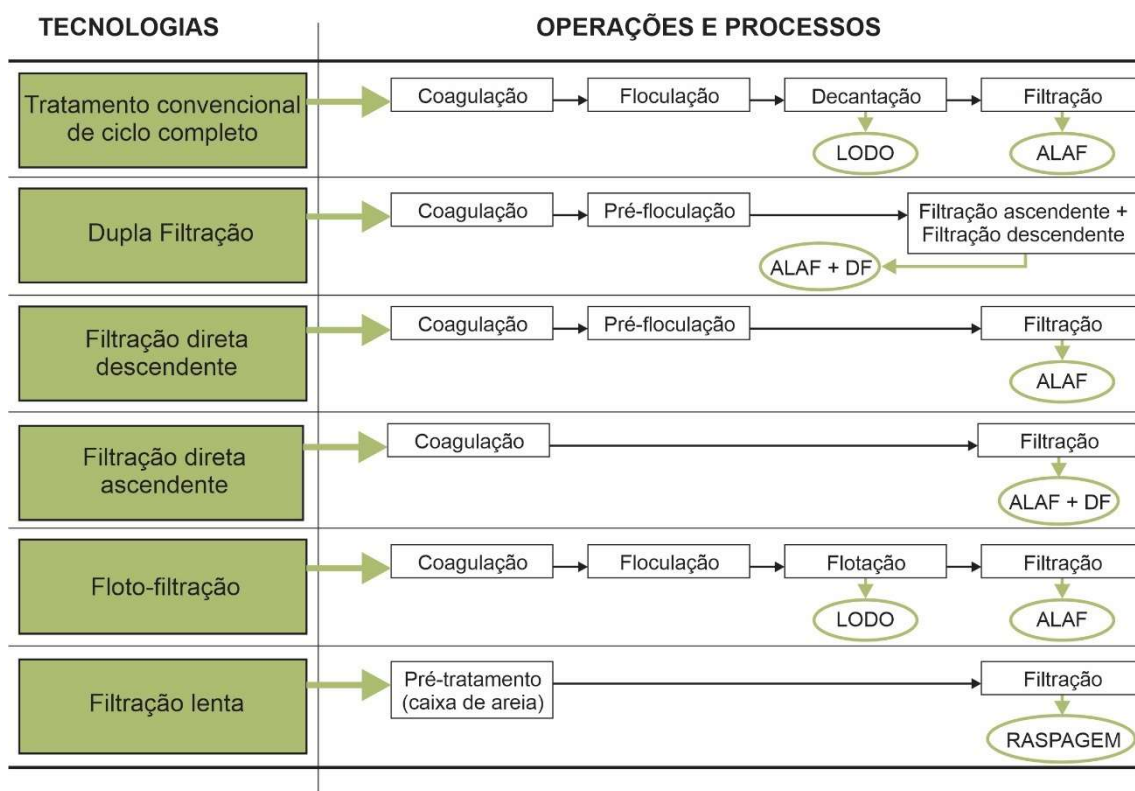
Em seguida, a água clarificada nos decantadores ou flotadores é encaminhada para os filtros, que contém materiais granulares com granulometria apropriada, geralmente areia ou antracito e areia. Dependendo da vazão da água a ser tratada e do número de unidades filtrantes, pode-se optar pela filtração com taxa declinante variável e evitar o uso de equipamentos de controle de nível ou taxa.

Por fim, realiza-se a desinfecção final e correção do pH (Achon, 2008, p. 21 e 22).

Conforme mencionado anteriormente, a composição do lodo gerado em ETAs varia de acordo com os produtos químicos utilizados no tratamento e com as características da água bruta. No tratamento convencional de ciclo completo, esses resíduos são gerados na etapa de decantação (lodo) e na filtração (água de lavagem dos filtros), conforme demonstrado na figura 01. Além dos coagulantes sulfato de alumínio ou hidróxido de ferro, a presença de carvão ativado em pó, cal e polímeros é comum nos lodos das ETAs (Tsutiya e Hirata, 2001).

Além disso, o lodo apresenta como característica relevante a elevada umidade, geralmente superior a 95%, o que o torna predominantemente fluido. Essa condição dificulta o manuseio, o transporte e a disposição final adequada. Por essa razão, uma das principais metas do tratamento desses resíduos é a redução de seu volume, com o objetivo de minimizar os custos operacionais e os potenciais impactos ambientais decorrentes de sua disposição (Reali, 1999).

**Figura 1** - Tecnologias de tratamento de água com indicação dos pontos de geração de resíduos dos sistemas de tratamento.



Fonte: Adaptado de Achon, 2008, p.20.

Legenda: ALAF: água de lavagem dos filtros; DF: descarga de fundo.

Com base no contexto apresentado, Reali (1999) destaca que, nas gerências de sistemas de tratamento, a atenção costuma estar concentrada no produto final, enquanto aspectos como a proteção dos mananciais, a qualidade dos produtos químicos utilizados e as características dos resíduos gerados recebem pouca consideração.

### 3.1.2. Sistema de tratamento de esgoto

A Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, define esgotos sanitários como os “despejos líquidos residenciais, comerciais, águas de infiltração na rede coletora, os quais podem conter parcela de efluentes industriais e efluentes não domésticos” (CONAMA, 2011).

Segundo Haandel e Cavalcanti (2001), a remoção da matéria orgânica é uma das principais finalidades do tratamento de esgoto doméstico, sendo geralmente realizada por processos biológicos, que são naturais, mais econômicos e mais confiáveis em comparação a outros métodos. Nesses sistemas biológicos, as bactérias, em sua maioria heterotróficas, são as principais responsáveis pela degradação ou estabilização da matéria orgânica, utilizando-a tanto como fonte de matéria quanto de energia.

Os sistemas de tratamento de esgoto podem ser divididos em aeróbios e anaeróbios, a depender da presença ou ausência de oxigênio nas reações biológicas envolvidas. Entre os processos aeróbios, destacam-se os lodos ativados, os reatores aeróbios com biofilmes e as lagoas de estabilização aeróbias. Já entre os anaeróbios, encontram-se o filtro anaeróbio, o reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente – UASB e as lagoas de estabilização anaeróbias, conforme apresentado esquematicamente na figura 02 (Von Sperling, 2005).

Segundo Reis (2017), os graus de tratamento em uma ETE são geralmente classificados em etapas preliminar, primária, secundária e terciária. O tratamento preliminar consiste em operações físicas, como peneiramento e sedimentação, voltadas principalmente à remoção de sólidos grosseiros e areia. O tratamento primário tem como foco a remoção de sólidos sedimentáveis, como a matéria orgânica em suspensão, além de sólidos flutuantes, como óleos e graxas. Na etapa secundária, são removidas a matéria orgânica dissolvida, a matéria orgânica em suspensão, sólidos não sedimentáveis, além de parte dos nutrientes e patógenos. Por fim, o tratamento terciário, também chamado de polimento do esgoto, possibilita a remoção de nutrientes e patógenos remanescentes, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos e outros sólidos em suspensão.

A quantidade e as características dos lodos produzidos também dependem da qualidade dos esgotos e do tipo de tratamento adotado, por isso os mecanismos de gestão desses resíduos devem ser planejados já na concepção do sistema, a fim de evitar transtornos e impactos ambientais negativos decorrentes da falta de planejamento e estratégia para sua utilização ou disposição (Andreoli e Pinto, 2001).

De acordo com Boratto e Von Sperling (2013), o processamento do lodo pode envolver diferentes etapas, cuja aplicação depende das suas características e do objetivo da destinação final. Entre essas etapas estão o adensamento ou espessamento, voltado à remoção de umidade; a estabilização ou digestão, que visa à redução da matéria orgânica; o condicionamento, necessário em alguns casos para a desidratação; a própria desidratação ou desaguamento; e, por fim, a higienização, que busca eliminar organismos patogênicos.

**Figura 2** - Esquema sobre as tecnologias de tratamento de esgoto.

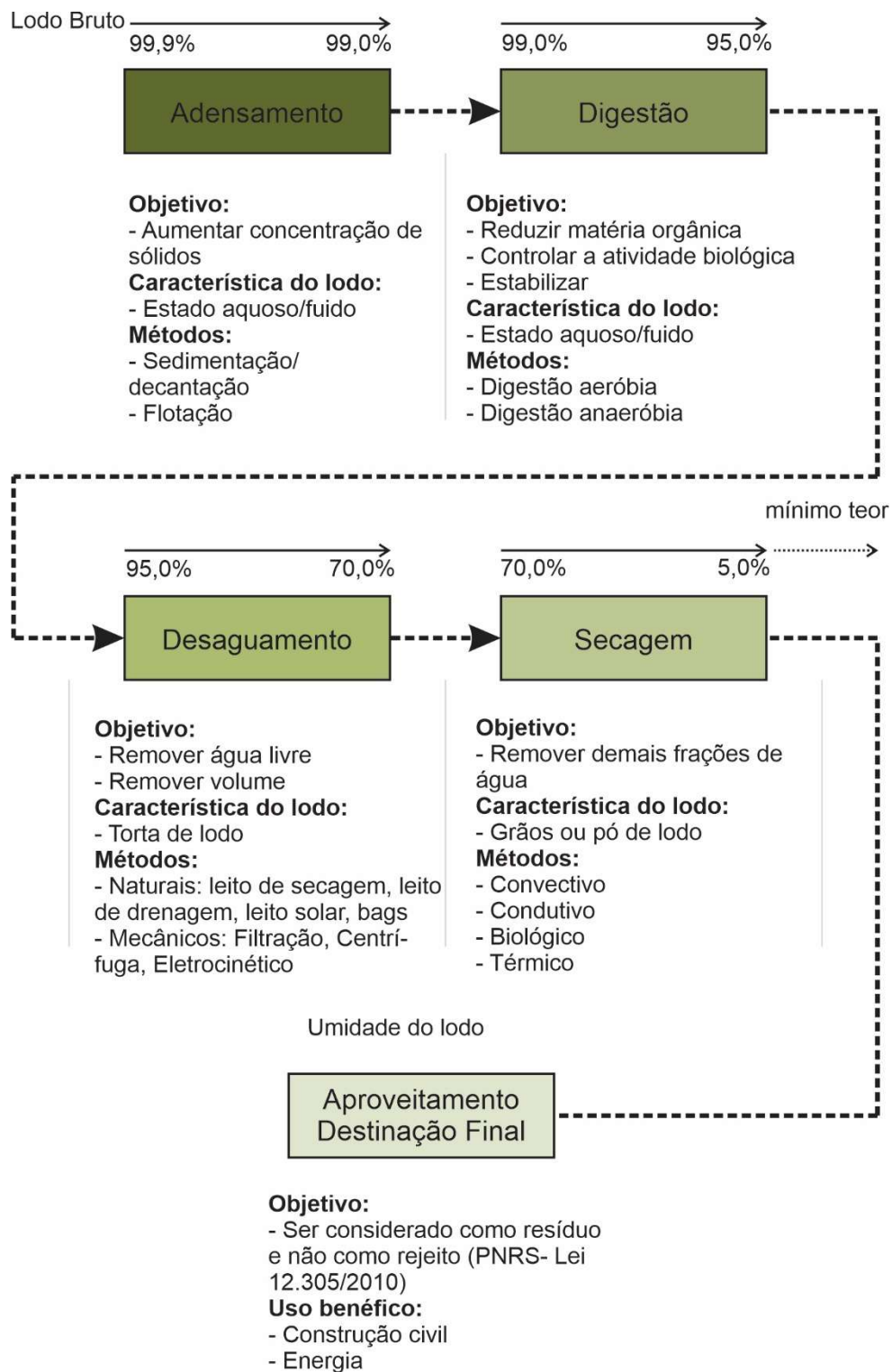


Fonte: Elaborado pela autora de acordo com Von Sperling (2005).

Andreoli et al. (1998) afirma que, a matéria orgânica proveniente do tratamento de esgoto pode melhorar a qualidade do solo, contribuindo para sua sustentabilidade e gerando benefícios ambientais, como a redução da erosão e a melhora na qualidade dos recursos hídricos. Desta forma, a disposição final adequada dos resíduos gerados nas ETEs é uma etapa fundamental do processo operacional, mas tem sido frequentemente negligenciada. Os projetos, de modo geral, são omissos quanto ao destino dos resíduos sólidos. Além dos ganhos ambientais e sociais, a gestão dos biossólidos representa um mercado promissor nas áreas de projeto, planejamento e gestão de serviços, equipamentos e insumos.

De acordo com Reis (2017), o tratamento de esgotos domésticos é composto por duas fases principais: líquida e sólida. A fase líquida corresponde ao efluente gerado em cada etapa do processo, até atingir as condições finais exigidas para o seu lançamento no corpo receptor. Já a fase sólida abrange o manejo dos resíduos e partículas retidas ao longo do tratamento na estação de tratamento de esgoto (ETE). Ainda segundo o autor, o tratamento dessa fase sólida, também denominado tratamento do lodo de esgoto, envolve as etapas de adensamento, digestão, desaguamento e secagem, conforme representado na Figura 3.

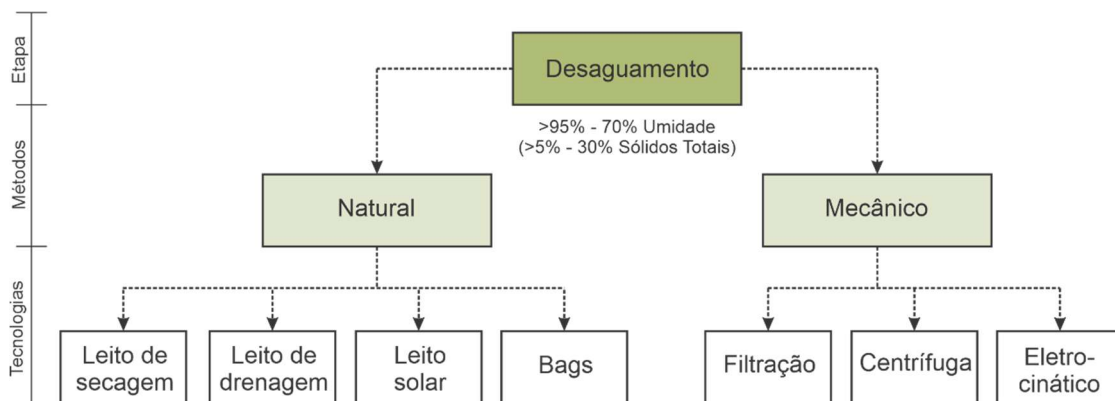
**Figura 3** - Representação e descrição das etapas do tratamento do lodo de ETE no que se refere à remoção de água.



Fonte: Elaborado pela autora de acordo com Reis (2017).

O tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgoto tem início com o adensamento, etapa responsável por reduzir o volume ou aumentar a concentração do lodo. Em seguida, ocorre a digestão, processo que visa à estabilização do material. Na sequência, realiza-se o desaguamento, com o objetivo de aumentar o teor de sólidos, diminuir os custos de transporte, preparar o lodo para a remoção adicional de água por meio da secagem e viabilizar seu aproveitamento ou disposição final em menores volumes (Reis, 2017).

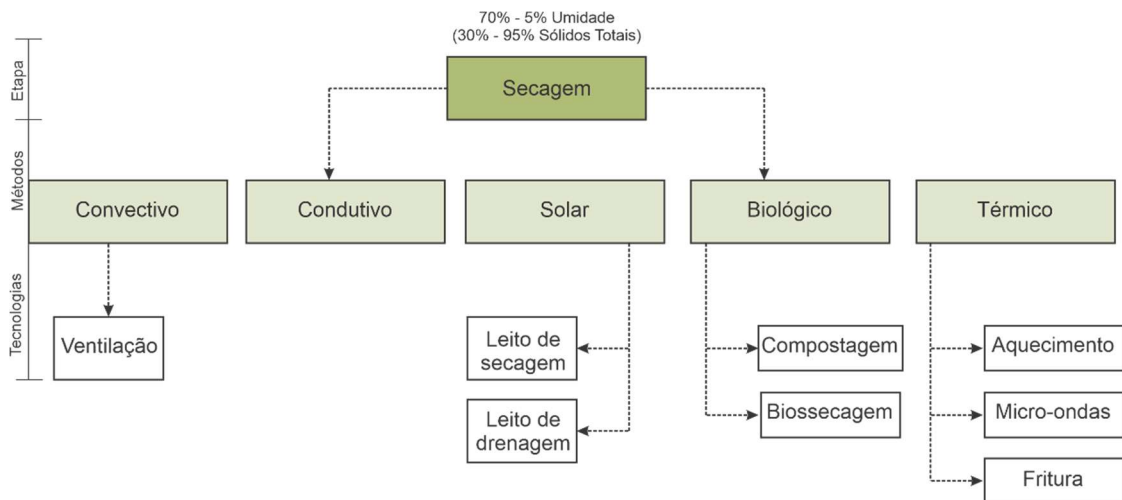
**Figura 4 - Métodos de desaguamento de lodo de ETE.**



Fonte: Elaborado pela autora de acordo com Reis (2017).

Segundo o mesmo autor, após o desaguamento, seja realizado por métodos mecânicos ou naturais, o lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto atinge, em geral, um teor de sólidos totais entre 15% e 30%, pois apenas a água livre e parte da água intersticial são removidas nesse estágio. Para se obter concentrações mais elevadas de sólidos, é necessária uma etapa adicional com maior aplicação de energia sobre as partículas, conhecida como secagem do lodo. Entre os métodos de secagem que podem ser utilizados estão os processos convectivo, condutivo, solar (como leitos de secagem e drenagem), biológico (como compostagem e biossecagem) e térmico (como aquecimento convencional, micro-ondas e fritura), conforme figura 5 (Reis, 2017).

**Figura 5 - Métodos de secagem de lodo de ETE.**



Fonte: Elaborado pela autora de acordo com Reis (2017).

### 3.2. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

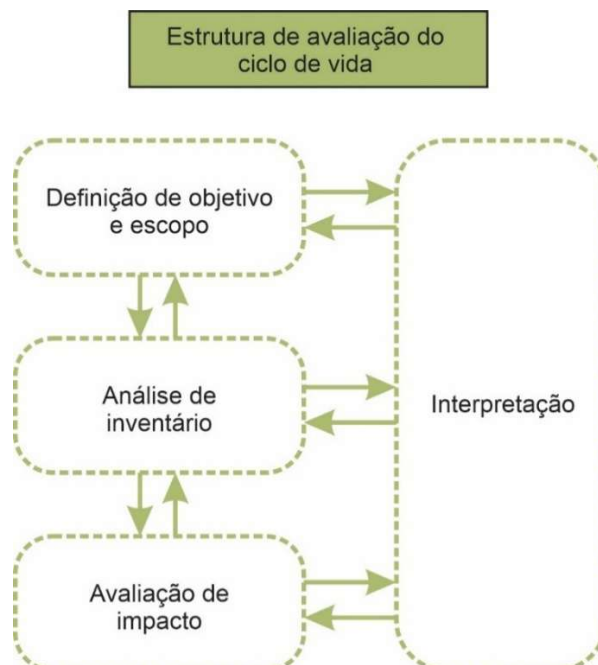
A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica estruturada que visa compreender os potenciais impactos ambientais associados a um sistema de produto ao longo de todas as etapas de seu ciclo de vida. Essa abordagem envolve a compilação e análise de dados sobre entradas e saídas do sistema, desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e uso, até o tratamento pós-uso e a disposição final (ABNT, 2009a). A metodologia da ACV é padronizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), por meio da norma ISO 14040, que define seus princípios e estrutura. No Brasil, essa norma foi publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 2009, juntamente com a norma ABNT NBR ISO 14044 (2009), que estabelece os requisitos e diretrizes para sua aplicação.

Essa metodologia tem se tornado cada vez mais relevante diante da crescente conscientização ambiental, oferecendo suporte à melhoria do desempenho ambiental de sistemas de produto, à tomada de decisão em organizações públicas e privadas, à definição de indicadores ambientais e ao marketing sustentável. A ACV é composta por quatro fases interdependentes: 1) definição do objetivo e escopo, 2) análise de inventário, 3) avaliação de impactos e 4) interpretação dos resultados, conforme representado esquematicamente na figura 06 (ABNT, 2009a).

O escopo de uma ACV, que abrange a definição das fronteiras do sistema e o nível de detalhamento, depende do objetivo e do uso pretendido do estudo, o que faz com que a profundidade e a abrangência da análise variem conforme o caso. A fase de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) corresponde à segunda etapa da ACV e consiste na coleta e organização dos dados de entrada e saída do sistema analisado. Os dados de entrada referem-se aos recursos consumidos pelo sistema, como matérias-primas, insumos químicos, energia e água, enquanto os dados de saída correspondem aos produtos, coprodutos, emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos gerados ao longo do processo.

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) representa a terceira fase, cujo objetivo é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do inventário, a fim de compreender sua significância ambiental. Por fim, a fase de interpretação reúne e examina os das etapas anteriores e oferece base para conclusões, recomendações e tomada de decisão de acordo com o escopo previamente definido (ABNT, 2009a).

**Figura 6** - Estrutura metodológica da ACV.



Fonte: Adaptado de ABNT, 2009a.

Além de facilitar comparações entre diferentes produtos e processos, a ACV contribui para subsidiar decisões estratégicas de empresas e formuladores de políticas, promovendo práticas mais sustentáveis ao longo de toda a cadeia produtiva. O *ILCD Handbook* reforça a importância de critérios rigorosos na coleta de dados, na categorização de impactos e na transparência dos procedimentos utilizados, garantindo maior credibilidade e utilidade dos resultados obtidos nessa avaliação (European Commission, 2010).

No âmbito do saneamento, a metodologia ACV tem sido aplicada internacionalmente com diferentes finalidades, tendo como principal objetivo apoiar tecnicamente os tomadores de decisão (Gutierrez, Fernandes e Chernicharo, 2022). Sua utilização envolve desde a implantação e modernização de estações de tratamento até a gestão de subprodutos como efluente tratado, lodo e biogás, além de contribuir para a formulação de políticas públicas voltadas à área. No Brasil, apesar do avanço na incorporação da ACV em estudos do setor, persistem desafios significativos relacionados ao acesso a dados representativos da realidade local, à limitação de bancos de dados do ICV e às barreiras técnicas e financeiras para o uso de *softwares* específicos (Gutierrez, Fernandes e Chernicharo, 2022).

**Figura 7 - Ciclo de vida do sistema de tratamento de água e esgoto.**



Fonte: Autora, 2025.

No contexto do fluxo de processos do saneamento, a Figura 5 apresenta todas as etapas do sistema de tratamento de água e esgoto, desde a captação da água bruta no corpo hídrico até o tratamento, distribuição, consumo, geração do esgoto, seu posterior tratamento e o lançamento do efluente tratado no corpo receptor. Ao longo dessas etapas, identificam-se as entradas, como produtos químicos, energia e equipamentos, e as saídas, como subprodutos e emissões, especialmente na fase de tratamento.

Para inserir e consolidar a ACV como prática de apoio à sustentabilidade ambiental no Brasil, o Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro), órgão colegiado vinculado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior responsável por formular e coordenar a política nacional de metrologia e qualidade, aprovou o Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (PBACV), com o objetivo de estabelecer a ACV como ferramenta estratégica para promover o desenvolvimento sustentável e a competitividade ambiental (Brasil, 2010b).

### **3.2.1. Estrutura metodológica da ACV**

A ACV é estruturada conforme estabelecido pela ABNT NBR ISO 14040 (2009), que define os princípios e a estrutura metodológica da aplicação da ferramenta (ABNT, 2009a).

De acordo com a referida norma, a ACV é composta por quatro fases inter-relacionadas: (i) definição de objetivo e escopo, (ii) análise de inventário do ciclo de vida (ICV), (iii) avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e (iv) interpretação. Embora apresentadas de forma sequencial, essas etapas possuem caráter iterativo, podendo demandar revisões ao longo do desenvolvimento do estudo (ABNT, 2009a).

#### **3.2.1.1. Definição de objetivo e escopo**

O objetivo do estudo da ACV deve explicitar, de forma clara, qual é a "aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo, o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem

divulgadas publicamente". Essa clareza é essencial para garantir que a abrangência, a profundidade e o nível de detalhamento do estudo sejam compatíveis com o objetivo declarado (ABNT, 2009a p.12).

O escopo deve ser definido com clareza e precisão, de modo a garantir que a abrangência, o nível de profundidade e o grau de detalhamento do estudo sejam adequados e suficientes para atender ao objetivo proposto (ABNT, 2009a).

Já o escopo do estudo deve estar suficientemente bem definido para garantir que a abrangência, a profundidade e o nível de detalhamento adotados sejam compatíveis com o objetivo previamente estabelecido. De acordo com a norma em questão, os elementos que compõem o escopo incluem:

O sistema de produto a ser estudado; as funções do sistema de produto; a unidade funcional; a fronteira do sistema; os procedimentos de alocação; as categorias de impacto selecionadas e metodologia para avaliação de impactos, bem como a interpretação subsequente a ser utilizada; requisitos de dados; pressupostos; limitações; requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados; análise crítica e tipo e formato do relatório" (ABNT, 2009a p.12).

A definição da função do sistema e da unidade funcional é fundamental para assegurar a comparabilidade dos resultados em um estudo de ACV. Um mesmo sistema pode desempenhar diferentes funções, sendo a escolha daquela a ser considerada dependente do objetivo e escopo do estudo. A unidade funcional representa a quantificação da função selecionada e serve como referência à qual todas as entradas e saídas do sistema são relacionadas, garantindo consistência nas comparações, especialmente entre sistemas distintos. Para cada sistema de produto avaliado, é necessário determinar o fluxo de referência correspondente à quantidade de produto exigida para cumprir a função especificada (ABNT, 2009a).

Outro aspecto essencial na modelagem do sistema é a definição de sua fronteira, que estabelece os processos elementares a serem incluídos, ou seja, as unidades básicas do sistema que apresentam entradas de recursos, como energia e matérias-primas e saídas para o meio ambiente, como emissões e resíduos (Greendelta, 2025). Essa delimitação deve considerar diversos estágios do ciclo de vida, a depender do tipo de estudo de ACV, como aquisição de matérias-primas, produção, uso, manutenção e disposição final, podendo ser

refinada ao longo do estudo. Por fim, os requisitos de qualidade dos dados precisam ser definidos de modo a assegurar que as informações utilizadas sejam adequadas e confiáveis, permitindo a correta interpretação dos resultados e o alcance dos objetivos definidos (ABNT, 2009a).

Também nesta etapa, conforme premissa da NBR ISO 14044 (2009), devem ser estabelecidas as categorias de impacto, os indicadores correspondentes e os modelos de caracterização a serem utilizados no estudo de ACV. A seleção desses elementos deve manter coerência com o objetivo previamente definido, assegurando que os resultados obtidos reflitam adequadamente os impactos ambientais relevantes para o sistema analisado (ABNT, 2009b). Esses conceitos serão apresentados e detalhados posteriormente.

### **3.2.1.2. Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

A fase de ICV consiste na coleta e quantificação das entradas e saídas relevantes de um sistema de produto, incluindo os recursos utilizados, as emissões e os resíduos gerados e é nessa etapa que envolve a aplicação de procedimentos de cálculo e a organização sistemática dos dados (ABNT, 2009a). O resultado é um balanço de massa e energia que permite avaliar os potenciais impactos ao longo do ciclo de vida do sistema analisado. A coleta de dados e modelagem do sistema deve seguir as definições do objetivo e escopo do estudo e, geralmente, representa a etapa que demanda maior esforço e recursos em um estudo de ACV (ABNT, 2009a).

Os dados do ICV podem ser coletados diretamente nos locais de produção, ou obtidos e calculados a partir de outras fontes, como bancos de dados, que são comumente utilizados em estudos (ABNT, 2009b).

Esse processo ocorre em etapas sucessivas e permite ajustes conforme novos dados são obtidos ou conforme mudanças no escopo se façam necessárias. A coleta de dados abrange energia, matérias-primas, produtos, co-produtos, resíduos e impactos ambientais, e deve considerar limitações práticas documentadas no estudo. Após a coleta, os dados são validados e relacionados aos processos e à unidade funcional, garantindo a precisão do inventário. Após o levantamento, realiza-se a conversão para a unidade funcional, que consiste

na quantificação da função, e todas as entradas e saídas do ICV relacionam-se a essa unidade (ABNT, 2009a).

Além disso, a alocação, definida como a repartição dos fluxos de entrada ou de saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto, é aplicada quando os sistemas produzem múltiplos produtos ou envolvem processos de reciclagem, de modo a assegurar que os resultados reflitam adequadamente as contribuições ambientais dos diferentes processos envolvidos (ABNT, 2009a).

Quando o ciclo de vida do produto ou serviço impacta outros ciclos fora do sistema analisado, aplica-se a alocação, que distribui a responsabilidade ambiental entre as funções do processo. A norma NBR ISO 14044 recomenda evitar a alocação sempre que possível e sugere a ampliação do sistema para incluir funções relacionadas a coprodutos (ABNT, 2009b).

### **3.2.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida – AICV**

A fase de AICV tem como objetivo “estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, utilizando os resultados do ICV”, caracterizando-os a categorias e indicadores específicos. Essa etapa também apoia a interpretação dos resultados e pode levar à revisão do objetivo e escopo do estudo, caso seja necessário. Devido à possibilidade de diferentes interpretações na escolha e modelagem das categorias de impacto, a transparência na descrição das premissas é essencial para assegurar a confiabilidade do processo. Essa fase também se concentra na análise dos resultados do inventário com o propósito de compreender melhor a relevância dos impactos ambientais identificados (ABNT, 2009a).

De acordo com a NBR ISO 14044 (2009b), as etapas obrigatórias da AICV são: (i) seleção das categorias de impacto, que consiste na definição das categorias ambientais relevantes, dos indicadores correspondentes e dos modelos de caracterização, em coerência com o objetivo e o escopo do estudo; (ii) classificação, que corresponde à correlação e atribuição dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas, conforme a natureza dos fluxos ambientais; e (iii) caracterização, que envolve o cálculo dos resultados dos

indicadores de categoria por meio da aplicação de fatores de caracterização, quantificando a contribuição dos fluxos para cada impacto ambiental.

A AICV busca analisar de forma abrangente as questões ambientais de um sistema de produto, porém pode não revelar diferenças significativas entre categorias de impacto para produtos alternativos devido às limitações como: desenvolvimento incompleto dos modelos de caracterização, restrições e lacunas na definição da fronteira e qualidade dos dados do inventário, além da falta das dimensões espacial e temporal, que aumentam a incerteza dos resultados. Além disso, ainda não existem metodologias amplamente aceitas para relacionar de forma precisa dados de inventário a impactos ambientais específicos, pois os modelos encontram-se em diferentes estágios de desenvolvimento (ABNT, 2009b).

**Figura 8 - Elementos da fase de AICV.**



Fonte: Adaptado de ABNT, 2009a.

A Figura 6 apresenta as fases da AICV. Os elementos obrigatórios transformam os resultados do ICV em indicadores de categoria (perfil ambiental) para diferentes categorias de impacto, enquanto os elementos opcionais permitem normalizar, agrupar ou atribuir pesos aos resultados, além de aplicar técnicas de análise da qualidade dos dados (ABNT, 2009a).

As normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), que abordam o tema, estabelecem a estrutura geral das fases para a realização da ACV e da AICV, mas não detalham os métodos específicos para a condução do estudo.

#### **3.2.1.4. Interpretação do ciclo de vida**

A fase de interpretação da ACV reúne os resultados do inventário e da avaliação de impacto, com o objetivo de gerar conclusões, identificar limitações e propor recomendações coerentes com o objetivo e escopo do estudo. Essa fase considera a natureza relativa dos dados da AICV, refletindo possíveis efeitos ambientais sem prever danos reais, e pode demandar revisões nas etapas anteriores para garantir consistência e clareza nos resultados (ABNT, 2009a). Gutierrez (2014) também explica que as quatro fases da ACV são interdependentes, o que possibilita o retorno a etapas anteriores ao longo do estudo.

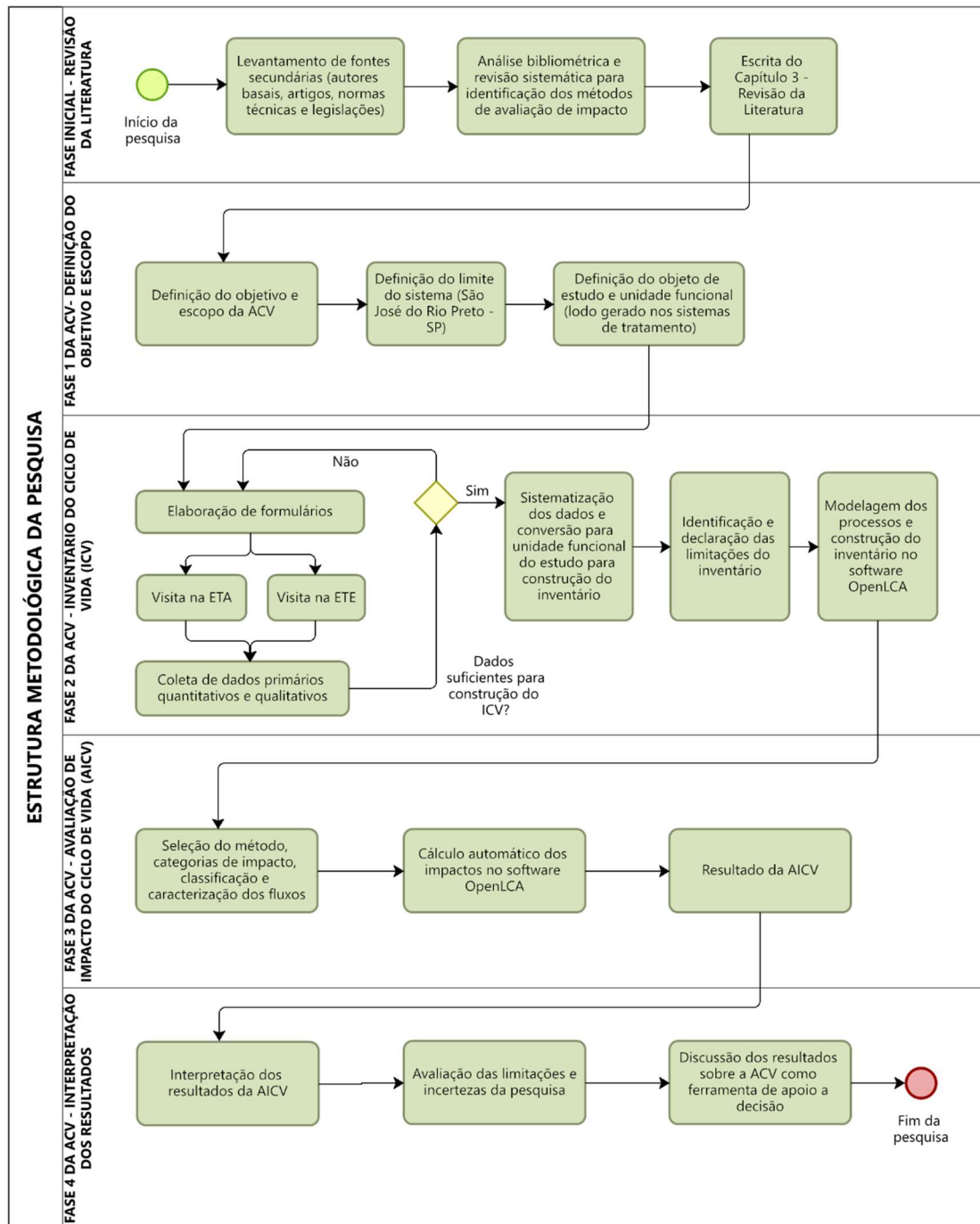
Segundo Bueno (2014), a fase de interpretação da ACV tem dois papéis distintos: durante o processo, serve para ajustar o modelo de inventário conforme os objetivos do estudo e ao final, busca extrair conclusões robustas e, em estudos comparativos, apoiar recomendações.

#### **4. METODOLOGIA**

O presente trabalho consiste em uma pesquisa de natureza investigatória e descritiva sobre a análise dos potenciais impactos ambientais associados ao lodo gerado pelos sistemas de tratamento no município de São José do Rio Preto – SP.

Inicialmente, realizou-se a fase inicial, que consiste na busca do referencial teórico de autores basais, artigos e normas técnicas, análise bibliométrica e revisão sistemática acerca dos métodos de avaliação de impacto empregados para resíduos do saneamento. Após essa fundamentação teórica realizou-se o levantamento dos diferentes resíduos do saneamento gerados nos processos de tratamento gerenciados pela Serviço Municipal de Água e Esgoto de São José do Rio Preto – SP, com a coleta de dados quantitativos e qualitativos, através de formulários de requisição de dados. A partir desse levantamento, a ACV foi aplicada para identificação do impacto ambiental do lodo gerado, seguindo as quatro fases estabelecidas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044: 1) definição do objetivo e do escopo, 2) análise do inventário, 3) avaliação de impactos e 4) interpretação dos resultados. A ACV tem o propósito de apoiar a tomada de decisão na escolha de alternativas ambientalmente adequadas para o manejo do lodo, e contribuir com subsídios técnicos para políticas públicas e estratégias de planejamento ambiental. A figura 17 sintetiza a estrutura metodológica adotada para a pesquisa.

Figura 9 – Estrutura metodológica desta pesquisa.



Fonte: Autora, 2025.

### Fase 1: Definição do objetivo e escopo

O estudo tem como objetivo analisar os potenciais impactos ambientais associados à geração do lodo na unidade de tratamento de esgoto (ETE) do município de São José do Rio Preto – SP, por meio de uma AICV.

São José do Rio Preto é um município de médio porte, localizado no interior do Estado de São Paulo, na região Sudeste do Brasil. Possui uma população de 480.439 habitantes, dos quais 94% residem em área urbana, conforme dados do IBGE (2022). Situado a aproximadamente 440 km da capital paulista, o município ocupa a décima posição entre os mais populosos do Estado. Além disso, é sede da Região Metropolitana de São José do Rio Preto, instituída pela Lei Complementar nº 1.359, de 24 de agosto de 2021.

**Figura 10** - Localização do município de São José do Rio Preto/SP.



Fonte: Silva, *et al.*, 2024.

O sistema de saneamento do município é administrado pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SeMAE). A Estação de Tratamento de Água (ETA), localizada na região central, possui vazão de 330 litros por segundo e realiza a distribuição por meio de seis centros de distribuição. A ETA é responsável por aproximadamente 20% do abastecimento, enquanto os 80% restantes são provenientes da captação de água subterrânea dos aquíferos Bauru e Guarani. Já a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) está localizada na Rod. Délcio Custódio da Silva, sentido Ipiranga - SP e apresenta capacidade instalada de 1.350 litros por segundo. De acordo com a conjuntura econômica de 2024, ambas as unidades atendem integralmente a população urbana do município.

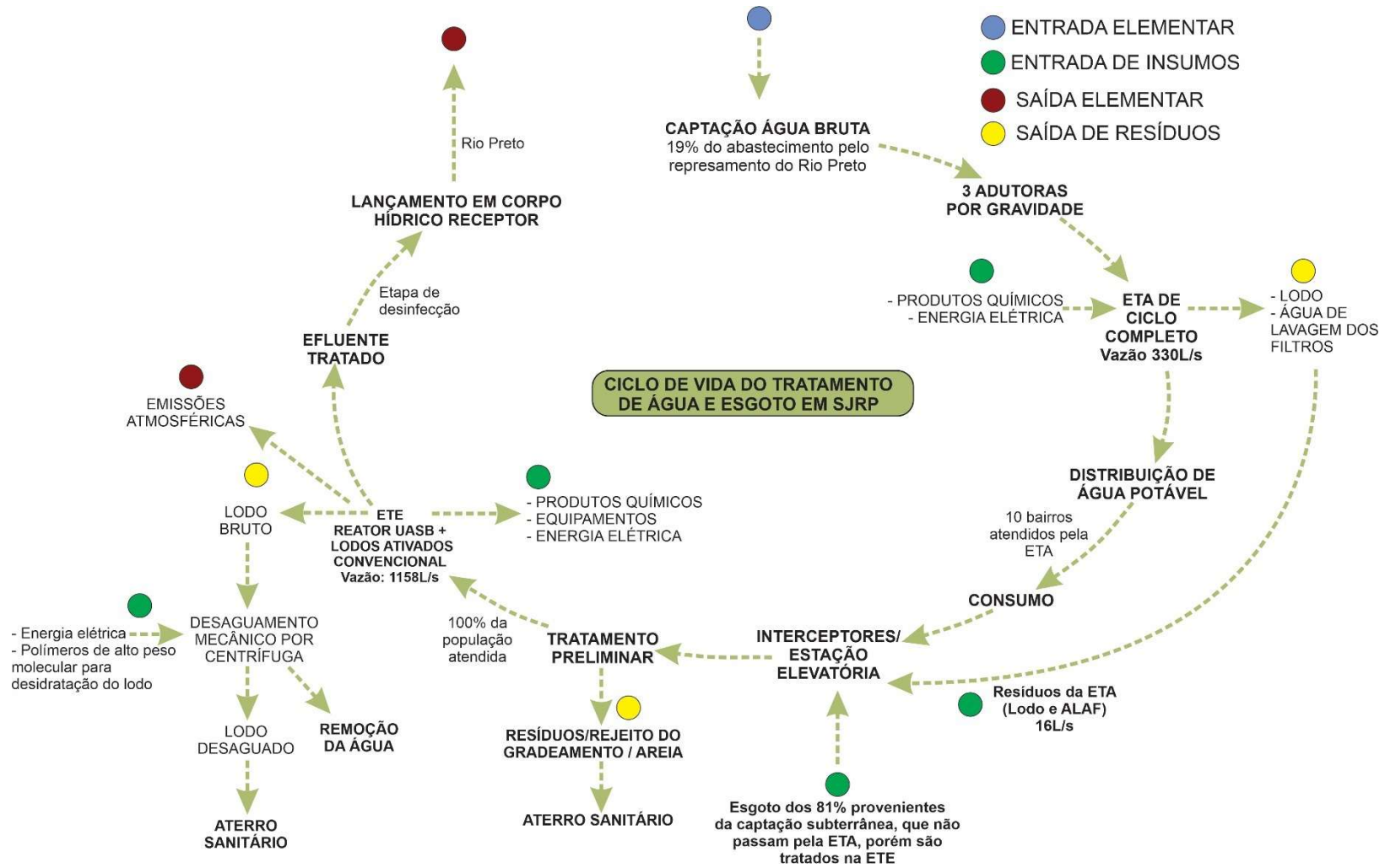
O resíduo analisado é proveniente do sistema de saneamento do município, iniciando-se na ETA e sendo encaminhado à ETE por meio de interceptores, onde passa pelo tratamento de esgoto e resulta no lodo final. O mapeamento do fluxo completo permite identificar o sistema produto e todas as

etapas do tratamento, bem como as entradas e saídas ao longo do processo, além de localizar o ponto de geração do resíduo, objeto deste estudo, que ocorre na etapa de tratamento do esgoto com o efluente do tratamento de água (lodo e água de lavagem dos filtros), feito por meio da tecnologia anaeróbica em reatores do tipo UASB. O lodo é então, desaguado através de uma centrífuga mecânica, para diminuir o teor de umidade e reduzir custos com transporte e encaminhado para disposição final em aterro sanitário, que está localizado no um município vizinho de Onda Verde - SP, cerca de 18km de distância.

O limite do sistema considera o ponto de geração do lodo até sua destinação final, conforme ilustrado na figura 19.

A unidade funcional adotada é **1kg de lodo**. Essa unidade foi definida com base na função principal do sistema, que consiste no tratamento do esgoto e na gestão ambientalmente adequada do lodo gerado ao longo do processo, servindo como referência para a quantificação e a comparação dos fluxos de entrada e saída nos processos mapeados.

Figura 11 - Limite do sistema do ponto de geração do lodo até sua destinação final.



Fonte: Autora, 2025 (dados SeMAE, 2023).

## **Fase 2: Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**

A etapa de inventário consiste na coleta, sistematização e quantificação de todos os fluxos de entrada e saída associados ao sistema estudado, conforme estabelecido pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044. Os dados quantitativos utilizados neste inventário são primários, referentes ao ano de 2024 e foram obtidos por meio de um formulário específico de solicitação de informações. Para a ETA, foram disponibilizados o volume de água bruta captada e de água tratada, os insumos químicos utilizados, o consumo de energia e os resíduos gerados. Para a ETE, obteve-se o volume de esgoto bruto recebido e do resíduo encaminhado pela ETA, o consumo de energia elétrica, o volume de lodo e rejeito do gradeamento. Esses dados foram convertidos para a unidade funcional definida no estudo, ou seja, 1kg de lodo.

O volume de lodo bruto na ETE não foi disponibilizado pela autarquia; apenas a porcentagem média de sólidos presente no lodo foi informada. Dessa forma, a massa e o volume de lodo bruto foram estimados com base nesse teor de sólidos, adotando-se o princípio da conservação de sólidos entre as etapas do processo. Essa abordagem permitiu a conversão dos dados disponíveis para as unidades funcionais definidas no estudo, viabilizando a modelagem do inventário de ciclo de vida do capítulo 5 deste trabalho.

Não foram disponibilizados dados referentes aos parâmetros do efluente tratado e às emissões atmosféricas provenientes do reator anaeróbio, o que constitui uma limitação do estudo.

A coerência dos dados com o sistema estudado foi garantida por sua origem local, correspondente ao município de São José do Rio Preto/SP, e por refletirem a tecnologia operacional atualmente utilizada nas unidades analisadas.

A base de dados ELCD 3.2 foi utilizada no *software OpenLCA 2.4.1* para o mapeamento dos fluxos associados às entradas e saídas dos processos modelados. Os processos definidos no estudo incluíram: 1) captação e tratamento de água na ETA, 2) tratamento de esgoto na ETE, 3) desaguamento do lodo e 4) transporte do lodo até o aterro sanitário. Cada processo apresenta entradas e saídas referentes a produtos químicos, insumos, consumo de energia

e geração de resíduos com base nos dados coletados e convertidos para a unidade funcional.

O *software* permite vincular esses fluxos a inventários existentes na base de dados ou cadastrá-los manualmente. A base ELCD 3.2 foi utilizada sempre que o fluxo correspondente estava disponível. Apenas os fluxos ausentes na base foram cadastrados manualmente. Os fluxos provenientes da ELCD possuem inventários completos de produção, o que possibilita relacionar cada entrada e saída do sistema a dados consolidados de ciclo de vida. Já os fluxos inseridos manualmente não possuem inventário associado.

O quadro 01 sintetiza os dados coletados para modelagem dos processos dentro do *software OpenLCA*.

**Quadro 01** – Relação de dados de entradas e saídas dos processos de tratamento e destinação do lodo para a fase de ICV

<b>Processo 1 - Captação e Tratamento de Água</b>	
<i>Entradas</i>	
Água Bruta	
Hipoclorito de Sódio	
Ácido Fluossilícico	
Ácido Sulfúrico	
Purate (Clorito de sódio + Peróxido de hidrogênio)	
Carvão Ativado (CAP)	
Ortopolifosfato de Sódio	
Cloreto Férrico	
Hidróxido de Cálcio	
Cal Hidratada	
Energia Elétrica	
Água Bruta	
<i>Saídas</i>	
Lodo e água de lavagem dos filtros (ALAF)	
Água tratada	
<b>Processo 2 - Tratamento de Esgoto</b>	
<i>Entradas</i>	
Lodo e água de lavagem dos filtros (ALAF)	
Esgoto bruto	
Energia elétrica	
<i>Saídas</i>	
Lodo bruto	
Rejeito gradeamento	
Efluente tratado	
Emissões Atmosféricas	
<b>Processo 3 – Desaguamento do lodo</b>	
<i>Entradas</i>	
Lodo bruto	
Polímeros (produto químico)	
<i>Saídas</i>	
Água removida	
Lodo desaguado	
<b>Processo 4 – Transporte e destinação do lodo em aterro sanitário</b>	
<i>Entradas</i>	
Lodo desaguado	
Transporte	
<i>Saída</i>	
Lodo desaguado	

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### **Fase 3: Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)**

A AICV consiste em caracterizar os fluxos de entrada e saída quantificados no ICV em indicadores ambientais representativos dos potenciais impactos associados à geração do lodo. Essa etapa foi desenvolvida em conformidade com as diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, seguindo os procedimentos de classificação e caracterização.

Inicialmente, os fluxos do ICV foram organizados por meio do procedimento de classificação, no qual cada substância e fluxo foi associado às categorias de impacto definidas pelo método ReCiPe 2016, adotando-se a abordagem *midpoint* (H).

A modelagem e o cálculo dos potenciais impactos ambientais foram realizados com o auxílio do *software OpenLCA*, no qual os fatores de caracterização do método ReCiPe 2016 foram aplicados automaticamente aos fluxos do inventário. Os resultados obtidos referem-se aos impactos potenciais associados à unidade funcional definida no estudo, correspondente a 1 kg de lodo em relação às categorias de impacto do método.

As categorias de impacto selecionadas para a AICV incluem: Mudanças Climáticas, Eutrofização de Água Doce, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Terrestre e Depleção de Recursos Fósseis. A seleção dessas categorias fundamentou-se na sua relevância ambiental para sistemas de saneamento e gestão de lodos, considerando os resultados identificados nos estudos incluídos na revisão sistemática, bem como a disponibilidade de dados compatíveis com o escopo definido para a pesquisa.

### **Fase 4: Interpretação do Ciclo de Vida**

A etapa de interpretação consiste na análise e na discussão dos resultados obtidos nas fases anteriores da ACV, com o objetivo de verificar sua coerência com o objetivo e o escopo definidos para o estudo, conforme preconizado pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044. As constatações decorrentes dessa etapa podem subsidiar a formulação de conclusões e recomendações direcionadas aos tomadores de decisão, as quais devem estar em consonância com os limites e as premissas estabelecidos no estudo.

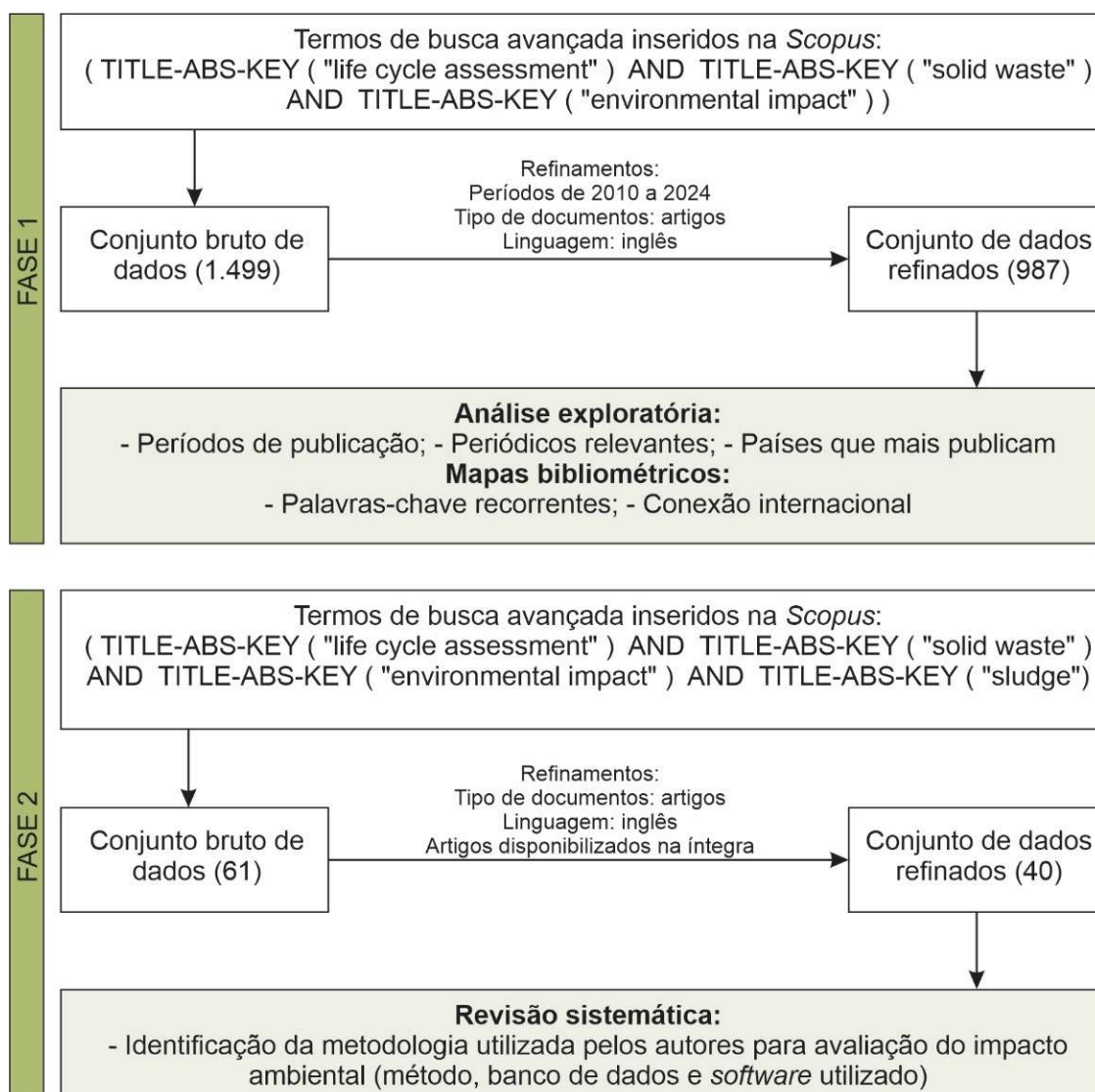
## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1. Análise bibliométrica e Revisão sistemática sobre os métodos de análise de impactos ambientais mais utilizados no âmbito do saneamento**

A análise bibliométrica e a revisão sistemática da literatura têm como finalidade identificar temas recorrentes e tendências de pesquisa sobre determinado assunto ao longo de um período específico. Essas abordagens envolvem a definição de recortes temporais, geográficos e bibliográficos, de modo a delimitar o escopo das interpretações (Silva *et al.* 2021).

Para identificar os métodos da avaliação de impacto ambiental em resíduos do saneamento na literatura, foi utilizada uma abordagem de pesquisa baseada em análise bibliométrica e revisão sistemática em nível global, integrando a ferramenta *VOSviewer* para apoiar o estudo das relações entre países e palavras-chave recorrentes. Para isso, o procedimento foi dividido em duas fases: (1) análise bibliométrica em nível global de estudos sobre avaliação do ciclo de vida e impactos ambientais relacionados a resíduos sólidos e (2) análise bibliométrica em nível global de estudos focados em resíduos sólidos provenientes de lodo, acompanhada de uma revisão sistemática das metodologias empregadas para avaliação dos impactos ambientais nas produções científicas. Em todas as fases, foram considerados somente as publicações com acesso livre.

**Figura 12** - Metodologia adotada para a revisão bibliográfica das fases 1 e 2.



Fonte: Autora, 2025.

A Fase 1 foi desenvolvida por meio da base de dados de produções científicas da *Scopus*, para identificação de artigos com relevância científica e que abordam o tema de ACV para resíduos sólidos. A busca avançada foi realizada no dia 14/04/2025 com a delimitação das palavras-chave voltadas para avaliação do ciclo de vida, impacto ambiental e resíduos sólidos. A associação das palavras-chaves estabelecidas, em conjunto com o indicador booleano AND, gerou a *string* de busca em inglês "life cycle assessment" AND "solid waste" AND "environmental impact". Como critério de refinamento, foram selecionados artigos em inglês publicados nos últimos 15 anos, totalizando 987 artigos.

Nesta fase, foi realizada uma análise exploratória com o objetivo de investigar a evolução temporal das publicações e identificar os países com maior

número de estudos, por meio da interpretação de gráficos e tabelas. A construção de mapas bibliométricos também foi conduzida com base no conjunto de dados final exportado, utilizando o *software* gratuito VOSviewer para apoiar o estudo das relações entre países e palavras-chave recorrentes.

O *software* VOSviewer é utilizado para criar mapas de redes bibliométricas a partir de dados extraídos das bases *Scopus*, *PubMed* e *Web of Science*. Ele permite identificar as principais palavras presentes nos títulos e resumos dos artigos das revistas selecionadas. As palavras agrupadas em *clusters* possuem relações diretas entre si, sendo essas conexões o critério para sua separação em diferentes grupos. O tamanho de cada palavra no mapa reflete seu peso dentro do *cluster*, representando a frequência de sua ocorrência nas publicações analisadas (Corrêa, Machado, 2018).

Na Fase 2, partiu-se da mesma *string* de busca em inglês, "*life cycle assessment*" AND "*solid waste*" AND "*environmental impact*" AND "*sludge*". Foi utilizado o refinamento da pesquisa, limitando-se para artigos em inglês, entre os anos de 2015 e 2025, e o total foram 40 artigos com acesso livre.

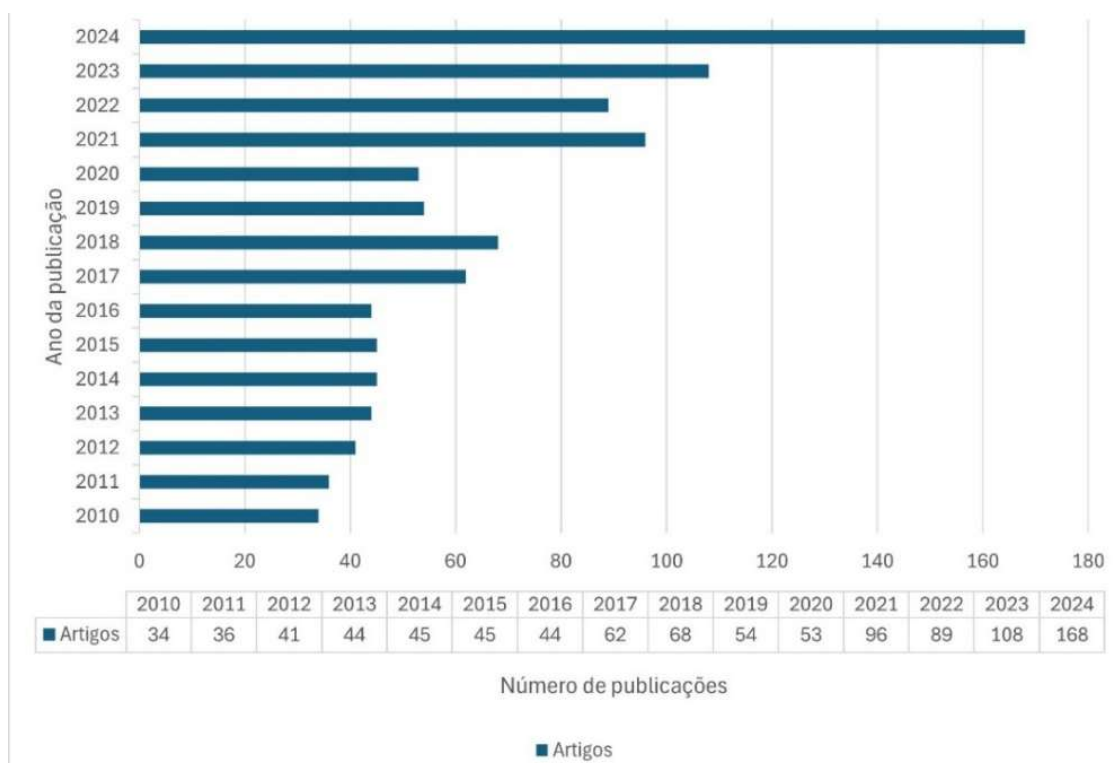
A análise sistemática foi realizada nos artigos selecionados na segunda fase (40), com o objetivo de extrair o método de avaliação de impacto ambiental utilizado pelos autores para ACV em resíduos de lodo.

#### **5.1.1.1. Análise exploratória e bibliométrica**

Considerando a busca inicial da Fase 1, que resultou em um total bruto de 1.499 publicações científicas entre 1994 (ano do registro mais antigo na base Scopus) e 2025, optou-se pelo refinamento da pesquisa para um maior aprofundamento atual do tema. O refinamento incluiu a seleção apenas de artigos científicos, em língua inglesa, publicados no período de 2010 a 2024 (últimos 15 anos). Na busca avançada, foram utilizadas as palavras-chave: avaliação do ciclo de vida, resíduos sólidos e impacto ambiental.

A Figura 32 apresenta a quantidade de publicações em artigos ao longo dos últimos 15 anos (2010 a 2024). Observa-se uma relativa constância no número de publicações entre 2010 e 2016, seguida por um crescimento significativo a partir de 2021. O ano de 2024 destaca-se como o período com maior concentração de publicações, representando 17,02% do total.

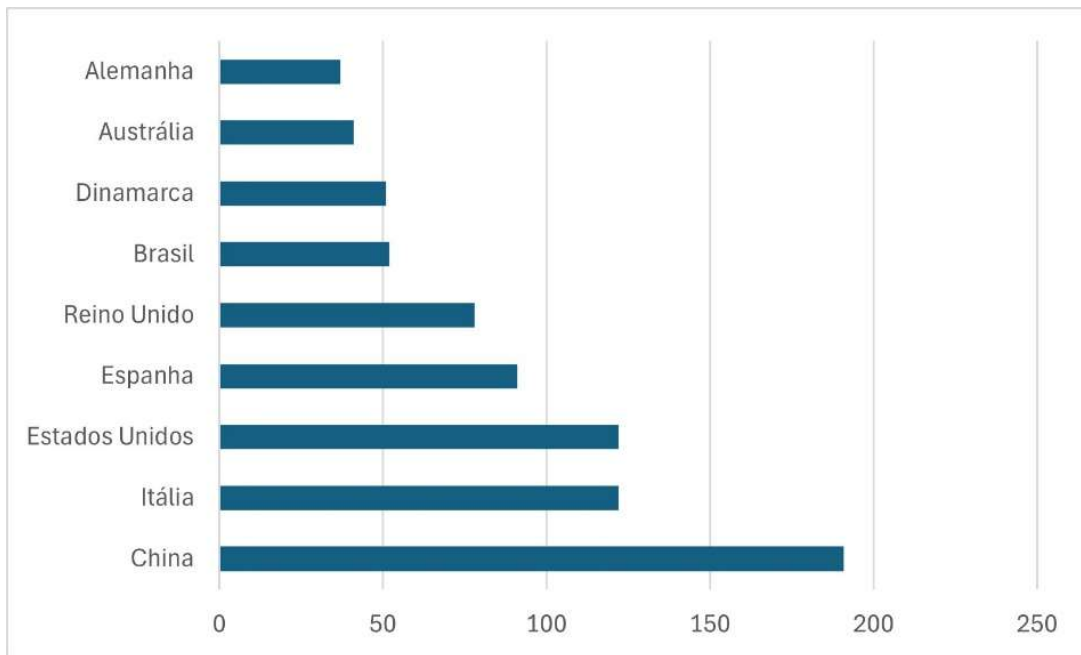
**Figura 13** - Total de publicações em artigos de 2010 a 2024.



Fonte: Elaboração própria com dados da busca avançada na Scopus, 2025.

Entre os nove países que mais publicam artigos sobre o tema, destacam-se a China, responsável por 13,62% das publicações, seguida pela Itália e pelos Estados Unidos, ambos com 8,70%. Na sequência, aparecem a Espanha (6,49%), o Reino Unido (5,56%), o Brasil (3,71%), a Dinamarca (3,64%), a Austrália (2,92%) e a Alemanha (2,64%), conforme representado no gráfico da figura 33.

**Figura 14** – Países que mais publicam artigos sobre o tema.



Fonte: Elaboração própria com dados da busca avançada na Scopus, 2025.

Os mapas bibliométricos possibilitam a extração de informações relevantes para a análise exploratória de um campo de pesquisa. O mapa de co-ocorrência de palavras-chave, em especial, permite visualizar quais termos são mais frequentes, indicados por círculos de maior tamanho, e quais aparecem citados em conjunto, conforme evidenciado pelas redes de ligação. Quanto maior o círculo, maior é a frequência de ocorrência da palavra-chave no conjunto de artigos analisados.

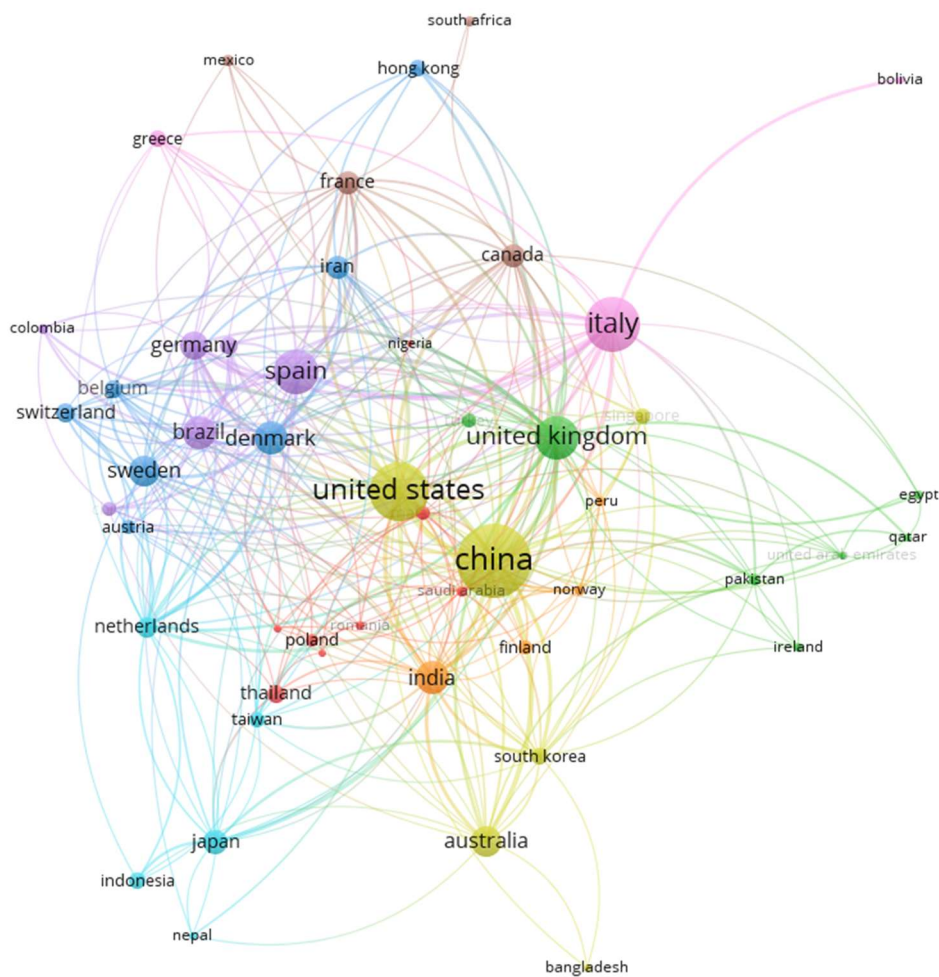
Na figura 34, as palavras-chave são organizadas em *clusters*, formados com base na proximidade e na frequência de co-ocorrência. Cada *cluster* é representado por uma cor distinta, agrupando termos que tendem a ser citados em conjunto e indicando, assim, áreas temáticas ou tópicos de pesquisa recorrentes na comunidade científica daquela área de investigação (Santos, Quadros, 2024).

As linhas que conectam os nós ilustram o grau de inter-relação entre as palavras-chave. Quanto mais espessa a linha, maior o número de vezes em que os termos aparecem associados nos documentos analisados, refletindo uma conexão mais forte entre eles. A distância entre os nós também fornece uma indicação do grau de relacionamento: nós mais próximos tendem a ter uma ligação mais forte, enquanto nós mais afastados indicam uma conexão mais



de artigos analisados. A formação dos clusters indica alianças regionais estratégicas voltadas para a pesquisa científica. Cada cor representa um grupo distinto de países que colaboram entre si com maior frequência. As linhas entre os nós ilustram as colaborações, sendo que cada linha é gerada sempre que ocorre uma coautoria em uma publicação científica (Santos, Quadros, 2024).

**Figura 16** - Mapa de relação entre países.



Fonte: *VOSviewer*, dados *Scopus*, 2025.

Para a construção do mapa bibliométrico, foi estabelecido um número mínimo de cinco documentos por país. Observa-se que a China apresenta o maior volume de colaborações, com 287 documentos e 9.330 citações, seguida pelos Estados Unidos, com 193 documentos e 9.667 citações, pelo Reino Unido, com 114 documentos e 5.585 citações, e pela Itália, com 120 documentos e

5.497 citações. Em relação ao Brasil, os dados apresentam 71 documentos e 2.070 citações.

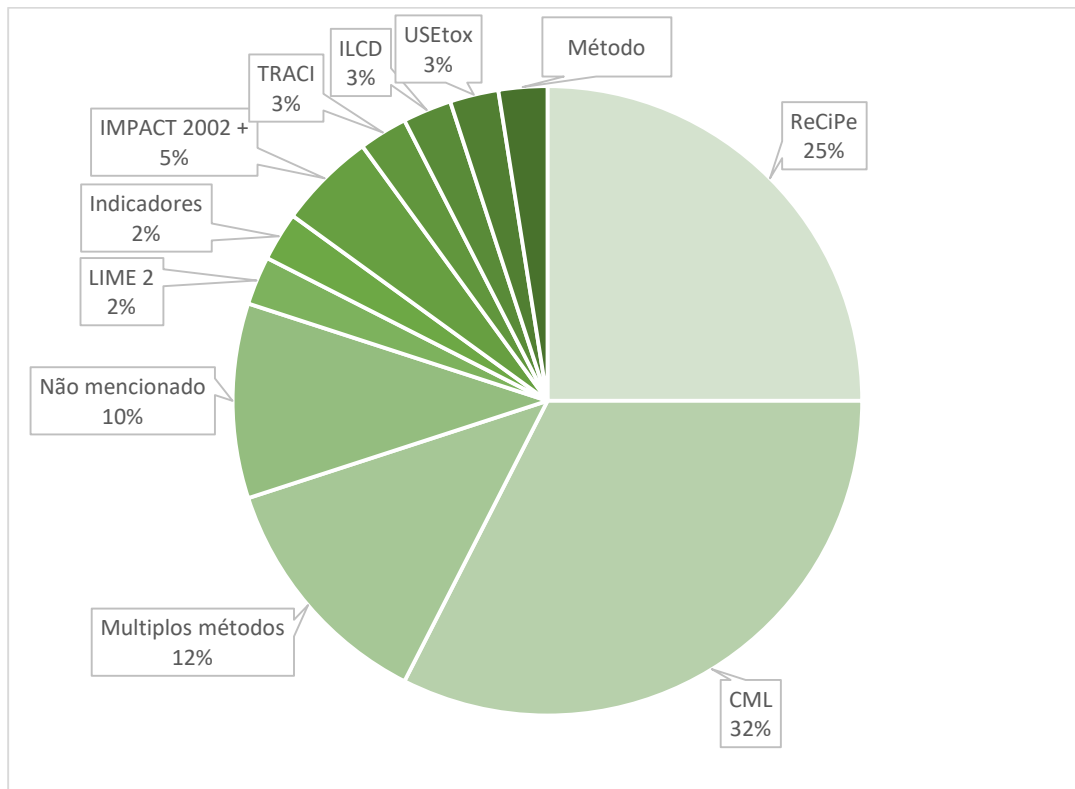
#### **5.1.1.2. Revisão sistemática dos métodos de avaliação de impacto**

Foram selecionados 40 artigos de acesso livre para compor a revisão sistemática, conforme detalhado na Fase 2 da Figura 31. Com a aplicação dos filtros e a inclusão da palavra-chave "*sludge*", os artigos identificados referem-se a estudos que aplicam a ACV e a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) aos resíduos de lodo gerados pelo saneamento.

O quadro 1, localizado no apêndice 3, apresenta a lista dos artigos analisados, que teve a finalidade de extrair: 1) as metodologias adotadas, 2) os softwares utilizados para a modelagem e 3) as bases de dados empregadas, que podem ser tanto provenientes da literatura quanto de dados primários coletados diretamente nas estações de tratamento. Desta forma, a autora desta pesquisa se objetivou a ler o resumo e o capítulo de materiais e métodos de cada artigo, a fim de compreender como os autores conduziram a terceira fase da ACV: Avaliação de impacto do ciclo de vida.

Foi possível notar a utilização de 11 tipos de métodos diferentes, sendo eles: 1) Método ReCiPe, que permite a conversão de todos os resultados da AICV em indicadores (Liu, *et. al*, 2025); 2) CML, que é um método genérico mundial para ACV (Huang *et. al*, 2023); 3) Múltiplos métodos, ou seja, os autores optaram por utilizar mais de um método para avaliar diversas categorias de impacto na pesquisa; 4) Método não mencionado ou não identificado pela autora dessa pesquisa, através da leitura do capítulo de metodologia e resumo dos artigos selecionados; 5) LIME 2; 6) Indicadores próprios ou específicos para o local e/ou a pesquisa; 7) IMPACT 2002 +; 8) TRACI; 9) ILCD; 10) USEtox e 11) Método próprio elaborado pelos autores da pesquisa. A figura 36 apresenta o gráfico "pizza" com o percentual de utilização de cada método.

**Figura 17** - Gráfico representando os métodos de avaliação de impacto utilizados nas pesquisas dos 40 artigos da revisão sistemática

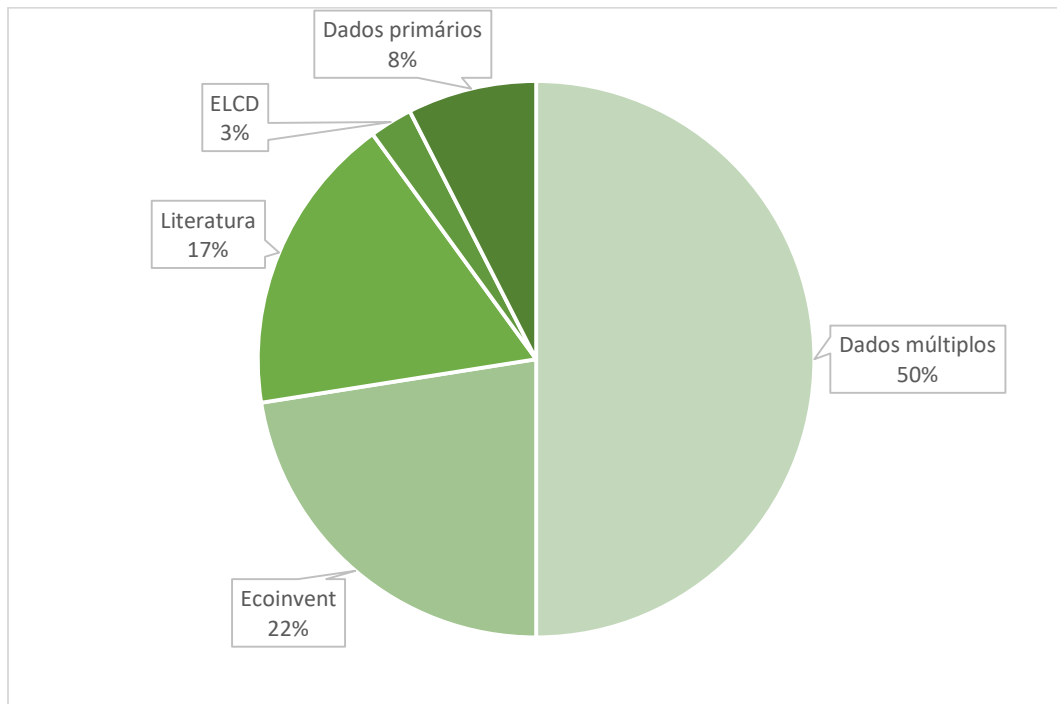


Fonte: Elaboração própria com dados da busca avançada na Scopus, 2025.

Os métodos são selecionados conforme as categorias de impacto definidas pelos autores das pesquisas e utilizam dados da fase de inventário, que podem ser modelados por meio de softwares específicos. As Figuras 37 e 38 apresentam, respectivamente, a origem dos dados utilizados e os softwares empregados nos artigos analisados na revisão sistemática.

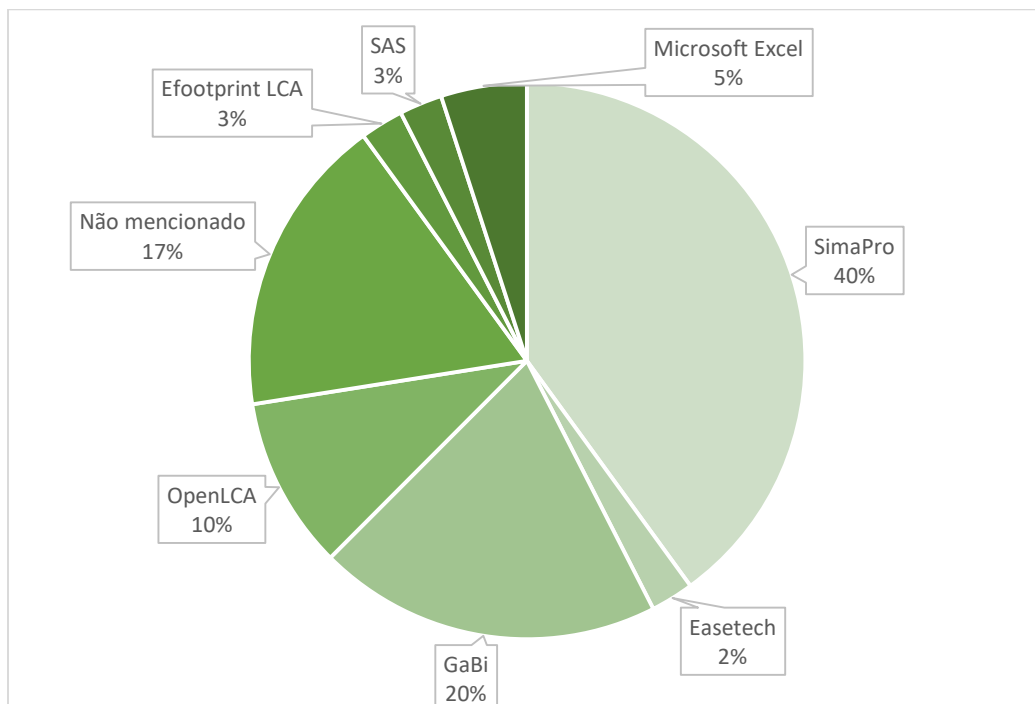
Foram identificadas 5 tipologias de extração de dados, sendo eles: 1) Dados múltiplos, ou seja, dados extraídos de mais de um banco de dados, sendo em sua maioria, da literatura + dados laboratoriais + banco de dados, o que configura 50% dos artigos da revisão sistemática; 2) Ecoinvent, que é uma base de dados confiável e precisa (Liu, et. al, 2025) e fornece dados abrangentes e capacidades de modelagem para calcular o impacto ambiental (Tian, et. al, 2024); 3) Dados da literatura; 4) ELCD (European Life Cycle Database) e 5) Dados primários, extraídos da própria estação de tratamento ou dados laboratoriais desenvolvido pelos autores.

**Figura 18** - Gráfico representando o local de extração dos dados do inventário do ciclo de vida utilizados nas pesquisas dos 40 artigos da revisão sistemática



Fonte: Elaboração própria com dados da busca avançada na Scopus, 2025.

**Figura 19** - Gráfico representando o software utilizado para modelagem da AICV nas pesquisas dos 40 artigos da revisão sistemática



Fonte: Elaboração própria com dados da busca avançada na Scopus, 2025.

Para modelar o grande volume de dados coletados na fase de inventário e dar continuidade à etapa de avaliação de impacto das categorias selecionadas, muitos autores recorrem ao uso de softwares especializados. Essas ferramentas facilitam a interpretação dos resultados por meio da geração de gráficos, tabelas e análises comparativas, contribuindo para uma compreensão mais clara e estruturada dos impactos avaliados. Alguns *softwares* possuem acesso livre, como o OpenLCA, enquanto outros somente mediante pagamento ao desenvolvedor do sistema.

Nos artigos da revisão sistemática, foi identificado o uso de 8 *softwares* para modelagem dos dados, sendo eles: 1) SimaPro; 2) Easetech; 3) GaBi; 4) OpenLCA; 5) Efootprint LCA; 6) SAS; 7) Microsoft Excel e 8) Não mencionado pelo autor. As versões utilizadas referem-se às atualizações dos sistemas disponíveis na época da publicação dos artigos.

A partir das informações extraídas dos 40 artigos selecionados na Fase 2 da revisão sistemática, observou-se que no capítulo de materiais e métodos, a grande maioria utilizou a metodologia padrão da ISO 14040 e 14044, específica para a ACV, sendo as etapas: 1) Definição do objetivo e escopo; 2) Análise do Inventário do Ciclo de Vida; 3) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e 4) Interpretação dos resultados.

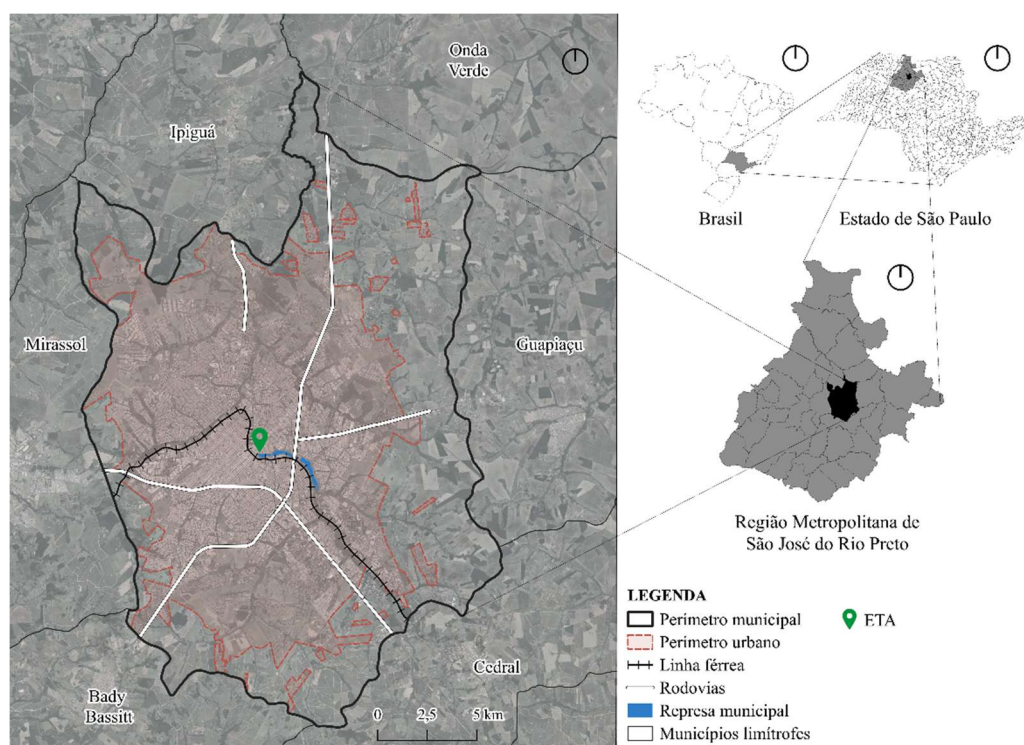
Na fase 3, a escolha do método de avaliação está diretamente relacionada à categoria de impacto que o autor pretende abordar na pesquisa, assim como à necessidade de comparar diferentes cenários. A avaliação de impactos ambientais atribui peso aos dados utilizados, que são, em sua maioria, obtidos a partir de bases de dados específicas para a fase de inventário e posteriormente modelados em softwares especializados ou em planilhas do Excel. No entanto, o uso de planilhas pode tornar-se uma tarefa complexa e de difícil operacionalização, especialmente diante do grande volume e da complexidade dos dados envolvidos.

Dessa forma, a definição adequada do método e das categorias de impacto é fundamental para o desenvolvimento da terceira etapa ACV.

## 5.2. ETA Palácio das Águas – São José do Rio Preto/SP

A ETA foi inaugurada em 1955 e está localizada na Rua São Paulo, nº 2231, na área central do município de São José do Rio Preto/SP. Próxima ao Parque da Represa Municipal, a ETA encontra-se instalada em um edifício histórico restaurado, conhecido como Palácio das Águas, que atualmente abriga tanto as operações técnicas quanto ações institucionais e educacionais promovidas pela autarquia. Sua proximidade com a Represa Municipal, um dos mananciais utilizados no abastecimento público, é estratégica, já que esse corpo hídrico fornece aproximadamente 20% da água bruta captada para tratamento.

**Figura 20** - Localização ETA Palácio das Águas.



Fonte: Autora, 2025.

Na época de sua inauguração, a população era de aproximadamente 60 mil habitantes, com apenas 6 mil ligações de água. Com a conclusão do *retrofit* em 2024, que consiste em uma técnica de revitalização aplicada a construções de patrimônio histórico, a ETA passou a contar com estrutura adequada para receber visitas voltadas à educação ambiental, além de melhorias no acesso e na segurança. O aerador, antes parte do processo de tratamento, foi retirado da

função original e transformado em chafariz, preservando seu valor simbólico para a população (Amorim, 2024; Vinha, 2024).

**Figura 21** - ETA Palácio das Águas após o *retrofit*.

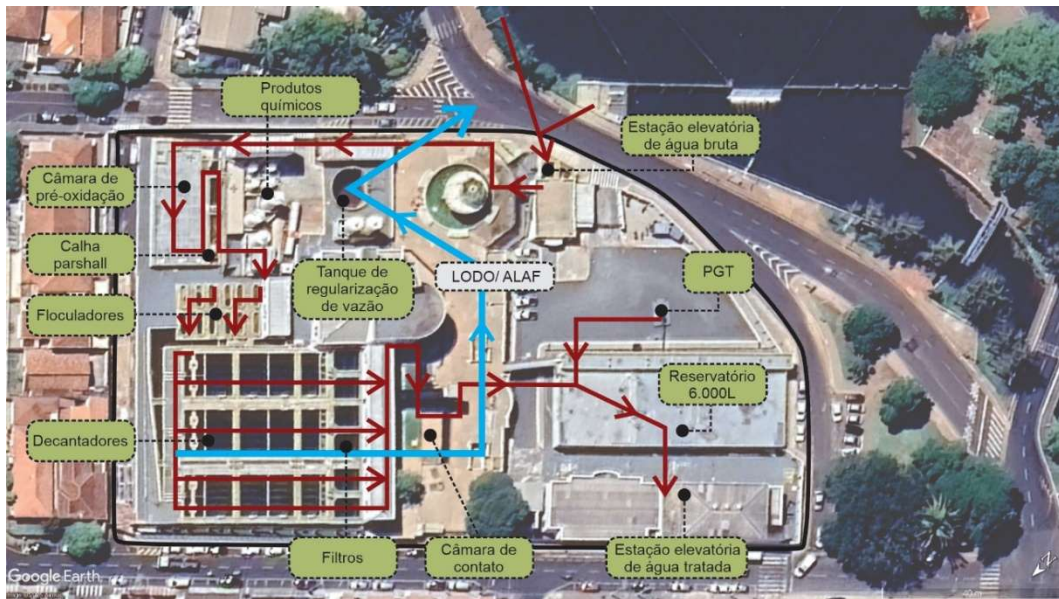


Fonte: Vinha, 2024.

O sistema de captação de água no município ocorre por três formas principais: cerca de 19% da água é captada superficialmente na represa municipal, 22% provêm da captação subterrânea do Aquífero Guarani e os 59% restantes são provenientes do Aquífero Bauru (Conjuntura Econômica, 2024). A água captada na represa passa por tratamento na ETA, enquanto a água subterrânea, por apresentar menor vulnerabilidade à contaminação, recebe apenas os processos de cloração e fluoretação antes de ser distribuída.

O levantamento de dados, realizado a partir do formulário (apêndice 1) e a visita à unidade, evidenciou que a ETA, gerenciada pelo SeMAE, adota o modelo convencional de tratamento, baseado em processos físico-químicos para a potabilização da água. O sistema é constituído por unidades de clarificação (floculadores, decantadores e filtros), além de etapas de desinfecção e polimento, que compreendem a aplicação de cal e a fluoretação.

**Figura 22** - Fluxograma do processo de tratamento de água na ETA.



Fonte: SeMAE, 2024, adaptado pela autora.

Na figura 23 é possível observar o fluxograma do processo de tratamento de água na ETA, de acordo com as informações obtidas pelo SeMAE, onde a linha vermelha é o fluxo da água, desde a captação na Represa Municipal, passando pelas etapas de tratamento, até o envio para o reservatório e estação elevatória de água tratada. Ainda segundo a autarquia municipal, a ETA é responsável por distribuir água potável para 10 bairros próximos, sendo eles: Boa Vista, Diniz, Redentora, Maceno, Alto Alegre, Urano, Eldorado, João Paulo, São Judas e Santo Antônio.

A ETA possui uma vazão de tratamento de 330L/s. Para o bombeamento da água tratada, possui Estação Elevatória de Água Tratada (EEAT), que recalca o volume para seis centros de distribuição, sendo quatro destinados ao abastecimento direto e dois para reforço. A partir desses centros, a água é distribuída por gravidade à rede de consumidores (SeMAE, 2024).

Entre os produtos químicos utilizados no tratamento da água, estão: Hipoclorito de sódio, ácido fluossilícico, ácido sulfúrico, purate, carvão ativado (CAP), ortopolifosfato de sódio, cloreto férrico, hidróxido de cálcio e cal hidratada (SeMAE, 2024).

Segundo Fiore *et al.* (2020), no Brasil, as ETAs costumam empregar coagulantes à base de óxidos de ferro ou de alumínio, o que resulta na geração

de resíduos comumente denominados lodo férrico e lodo de alumínio. No caso da ETA de São José do Rio Preto, o Cloreto Férrico é utilizado na etapa de adição de produtos químicos (SeMAE, 2024), conforme figura 24.

**Figura 23** - Adição de cloreto férrico na etapa de tratamento.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

Ainda segundo o fluxograma apresentado na figura 23, a linha azul refere-se ao fluxo de saída do resíduo, que é um subproduto gerado na etapa de decantação e na lavagem dos filtros. Durante a visita, foi possível observar as limitações de espaço físico na ETA, o que dificulta um possível tratamento desse lodo e água de lavagem dos filtros no próprio local.

De acordo com Achon, Barroso e Cordeiro (2013), embora apresente elevado teor de umidade, o lodo é classificado como resíduo sólido, devendo, portanto, atender aos princípios estabelecidos pela PNRS (Brasil, 2010) e às diretrizes da norma NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004). Na ETA Palácio das Águas, os decantadores possuem removedores automático e o lodo gerado é “equalizado e posteriormente encaminhado para tratamento na ETE por meio de um interceptor. Atualmente, não há projeto de reaproveitamento do lodo, em razão das limitações de espaço físico na estrutura da ETA” (SeMAE, 2024).

**Figura 24** - Etapa de filtração no tratamento da água.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

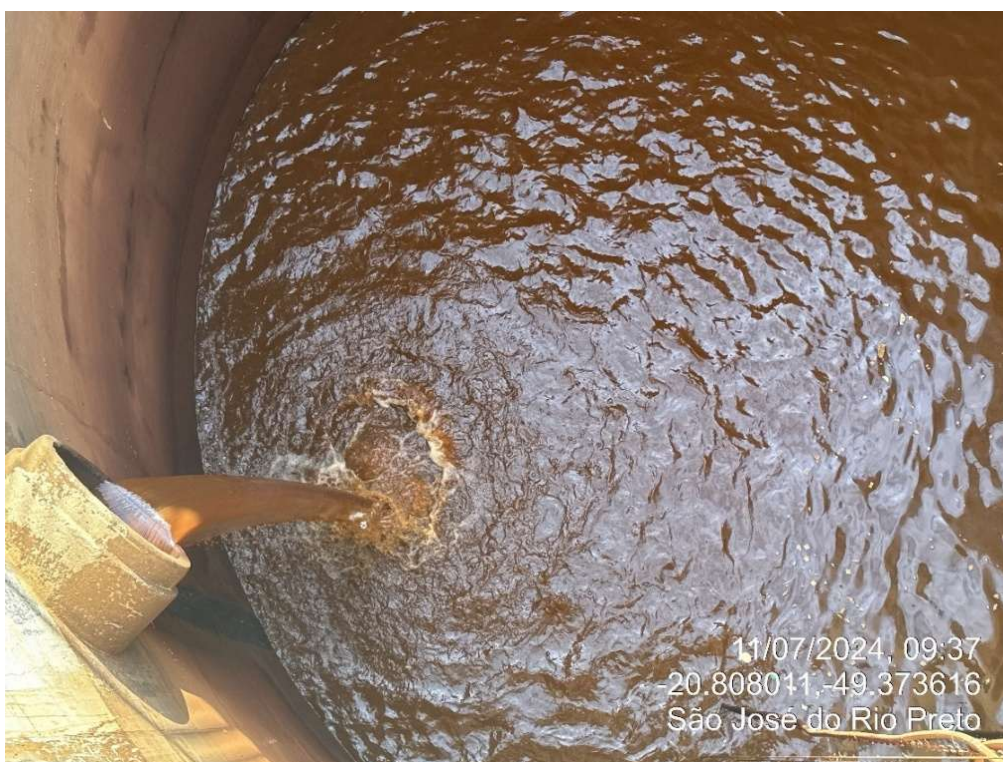
Os dados disponibilizados pelo SeMAE (2024), informam que durante o primeiro semestre de 2024, foi registrada uma média de aproximadamente um descarte de lodo a cada três horas na ETA Palácio das Águas. Cada operação corresponde à descarga do tanque de regularização de vazão até seu nível mínimo, com o conteúdo sendo direcionado ao interceptor que o conduz à ETE para posterior tratamento. A vazão média observada nesse processo foi de 16L/s, resultando em um volume médio mensal de cerca de 44.000.000 L/mês de lodo encaminhado para tratamento no período analisado. A figura 26 ilustra o lodo e água de lavagem dos filtros no tanque de regularização de vazão e é possível observar a presente forma líquida do resíduo.

A ETA não possui dados de classificação do resíduo enviado à ETE. A norma técnica ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos: Classificação define os critérios e procedimentos para identificar e classificar resíduos sólidos provenientes de atividades domésticas, industriais, comerciais, agrícolas e de serviços, estabelecendo seu grau de periculosidade com base nos potenciais riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Conforme essa norma, os lodos gerados nos sistemas de tratamento de água são enquadrados como resíduos

sólidos e devem ser manejados e destinados de acordo com as diretrizes nela estabelecidas (ABNT, 2004).

Os resultados apresentados por Guerra e Angelis (2005), obtidos por meio de análise laboratorial para a classificação do lodo de ETA do município de Rio Claro e Piracicaba/SP, que possuem formação do lodo mediante aplicação de cloreto férrico, indicam que esse resíduo se enquadra na Classe II-A, caracterizada como não perigosa e não inerte, conforme estabelecido pela ABNT NBR 10004.

**Figura 25** - Lodo e água de lavagem dos filtros (ALAF).



Fonte: Acervo da autora, 2025.

**Tabela 02** – Dados quantitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 01).

**Dados quantitativos da ETA – Palácio das Águas**

Vazão de tratamento	330L/s
Vazão do lodo encaminhado para ETE	16L/s
Tempo em que o lodo é encaminhado para ETE	A cada 3h

*\*dados referentes ao primeiro semestre de 2024.*

Fonte: SeMAE, 2024.

**Tabela 03** – Dados qualitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 01).

**Dados qualitativos da ETA – Palácio das Águas**

Forma de captação da água bruta	A captação de água bruta ocorre em dois represamentos do Rio Preto, sendo conduzida por gravidade à ETA por adutoras de 600 mm × 40 m (duas unidades) e 900 mm × 3.000 m.
Sistema de tratamento	Convencional de ciclo completo
Produtos químicos inseridos no tratamento	Hipoclorito de sódio, ácido fluossilícico, ácido sulfúrico, purate, carvão ativado (CAP), ortopolifosfato de sódio, cloreto férrico, hidróxido de cálcio e cal hidratada
Caracterização do lodo e ALAF gerado	Não existe
Equipamento mecânico	Os decantadores possuem removedores automáticos de lodo

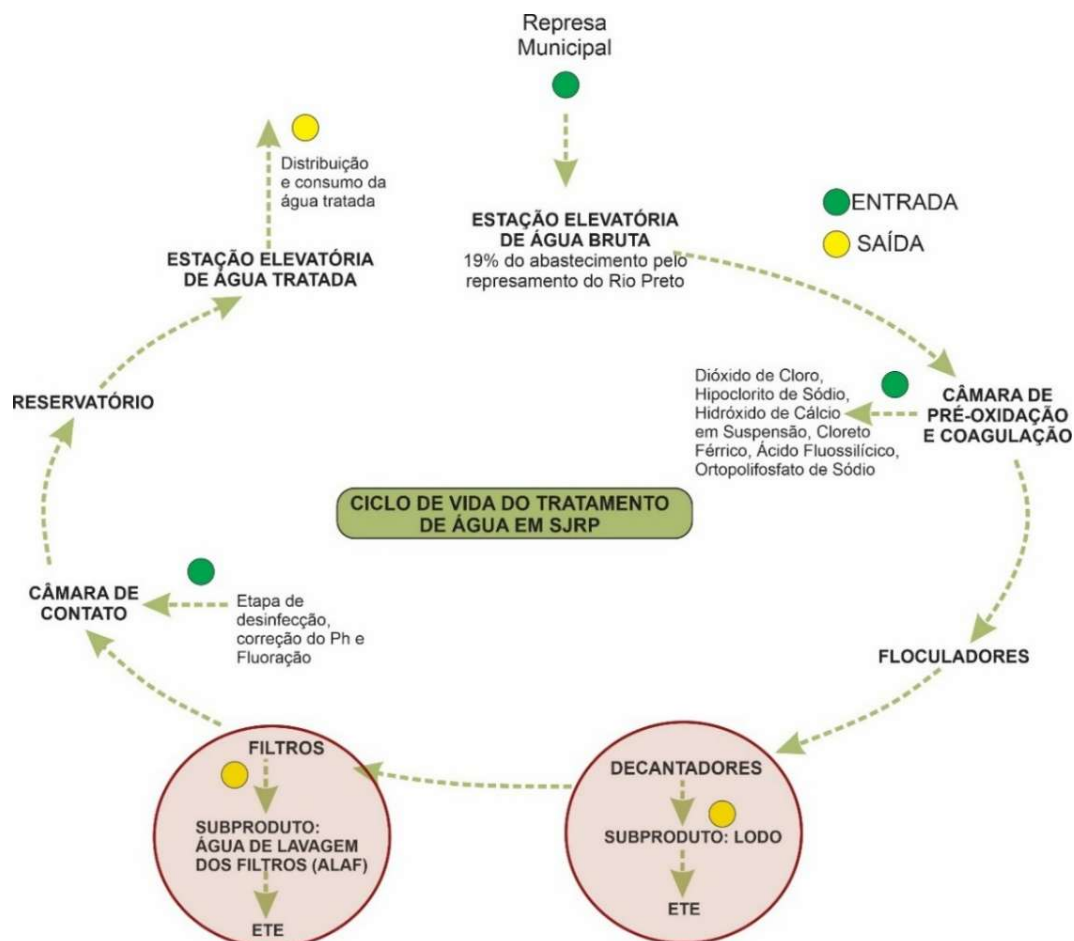
Fonte: SeMAE, 2024.

### 5.2.1. Fluxograma do sistema de tratamento de água

A metodologia ACV envolve a compilação e análise de dados sobre entradas e saídas do sistema, desde a extração de matérias-primas, passando pela produção e uso, até o tratamento pós-uso e a disposição final (ABNT, 2009a). Desta forma, foi elaborado o mapeamento do fluxograma do ciclo de vida da ETA, envolvendo todas as etapas de tratamento, com a identificação das entradas (produtos químicos) e saídas (resíduos), com ênfase na etapa de geração dos subprodutos (lodo e água de lavagem dos filtros). Assim, será possível identificar e analisar os potenciais impactos ambientais na fase de AICV.

O ciclo de tratamento, mapeado de acordo com os dados fornecidos pelo SeMAE, tem início na captação da água bruta no represamento do Rio Preto, responsável por cerca de 19% do abastecimento do município. Essa água chega à ETA por gravidade, por meio de três adutoras (duas com 600 mm de diâmetro e 40 m de extensão, e uma com 900 mm de diâmetro e 3.000 m de extensão).

**Figura 26** - Ciclo de vida do tratamento de água em São José do Rio Preto.



Fonte: Autora, 2025 (dados SeMAE).

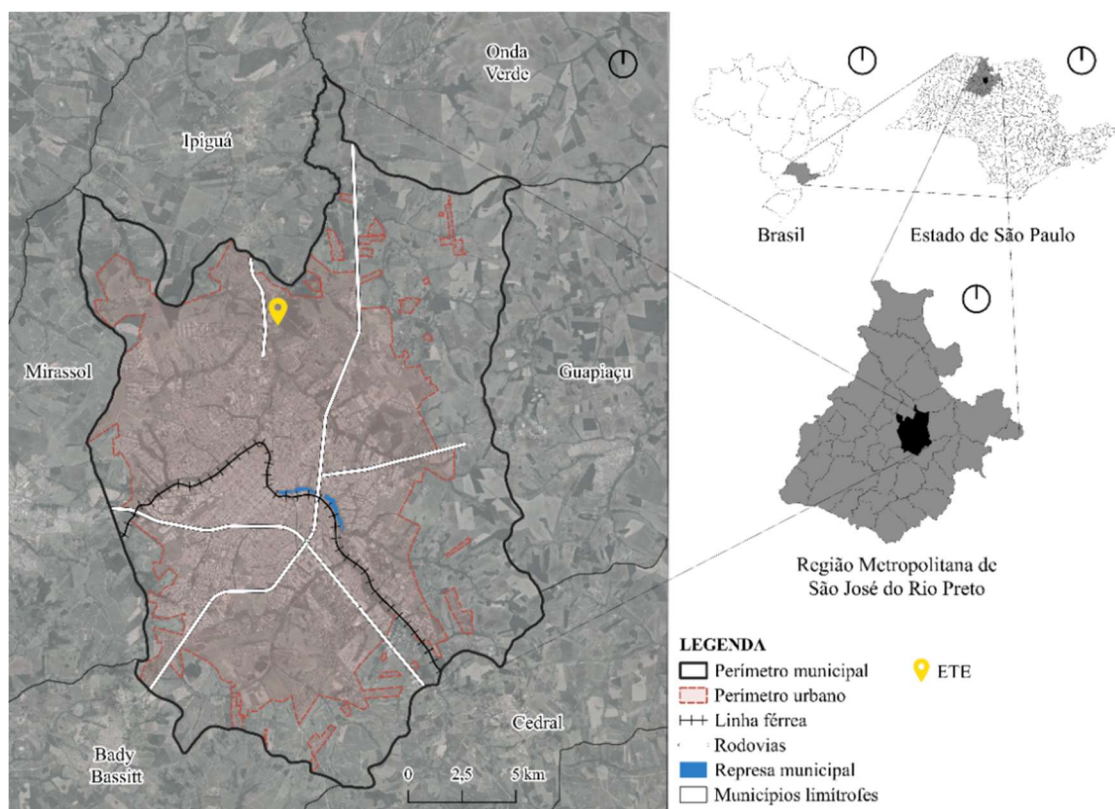
A primeira etapa do processo é a pré-oxidação, na qual se aplica cloro para oxidar os metais e remover parte da matéria orgânica presente. Em seguida, adiciona-se cal para manter o nível da água adequado. A coagulação ocorre no tanque de mistura rápida, onde se adiciona cloreto férrico, para remover as partículas de sujeira que se aglomeram em flocos. Na etapa seguinte, a água segue para o tanque de floculação, onde é lentamente agitada para permitir que os flocos adquiram volume, peso e consistência adequados para a decantação. No decantador, esses flocos sedimentam no fundo, separando-se da água, que é então direcionada para os filtros, compostos por camadas de carvão, areia e cascalho. Concluída a filtração, a água passa pelos processos finais de desinfecção, correção de pH e fluoretação, com a adição de novos produtos químicos. Por fim, a água tratada é encaminhada aos reservatórios e estações elevatórias, de onde é distribuída para o consumo da

população. Na representação do fluxograma do tratamento da figura 27, nota-se em destaque a etapa de decantação, onde é gerado o lodo e a etapa de filtração, onde é gerado o resíduo de água de lavagem dos filtros. O decantador e filtros possui equipamento de remoção automática do lodo, que são enviados para o tanque de regularização de vazão e encaminhados para a ETE por interceptores para posterior tratamento junto com o efluente de esgoto sanitário (SeMAE,2024).

### 5.3. ETE – São José do Rio Preto/SP

A ETE de São José do Rio Preto foi inaugurada em 2008 e ocupa uma área de 27,7 alqueires na região norte do município, situada no encontro do rio Preto com o córrego São Pedro, às margens da rodovia Délcio Custódio da Silva, no quilômetro 4,5 da vicinal que liga o município a Ipiruá. Ao todo, são 435,6 mil metros quadrados destinados ao reflorestamento, à proteção ambiental e aos tanques de tratamento (SeMAE, 2025).

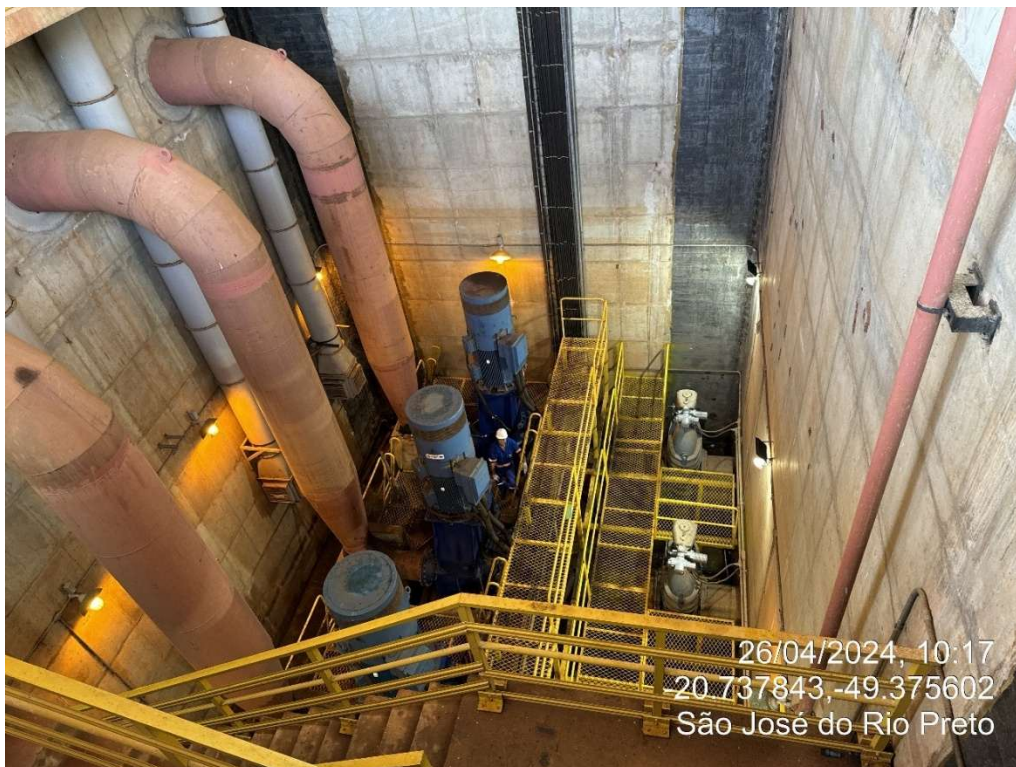
**Figura 27 - Localização da ETE de São José do Rio Preto.**



Fonte: Autora, 2025.

Assim como na ETA, foi elaborado um formulário específico para a requisição de dados (Apêndice 2) e realizada uma visita guiada por um profissional da própria estação. Durante a visita, verificou-se que o sistema de tratamento adotado na ETE é composto por reatores anaeróbios do tipo UASB, seguidos pelo processo de lodos ativados convencional. O esgoto bruto chega à ETE por meio de uma estação elevatória equipada com sistemas de bombeamento e, a partir desse ponto, todo o fluxo dentro da unidade ocorre por gravidade.

**Figura 28** - Estação elevatória de esgoto bruto.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

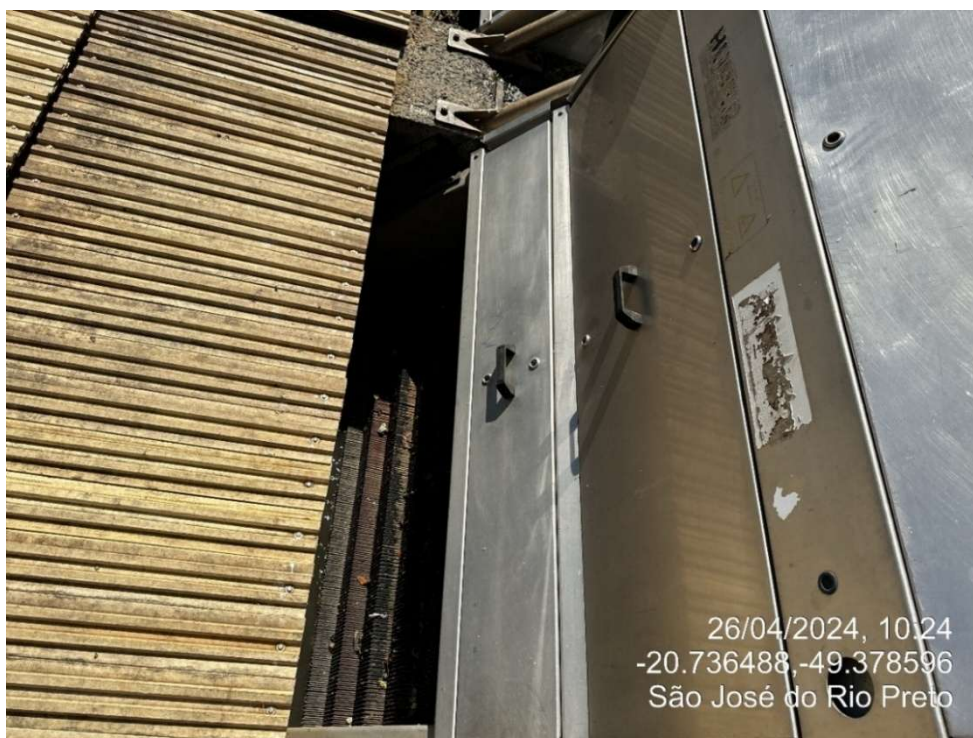
Foi identificado a geração de resíduos em 4 etapas do tratamento: na etapa de gradeamento grosso, onde são retirados particular maiores de resíduos, na etapa de gradeamento fino, com resíduos de areia e partículas menores e os lodos gerados no tratamento do reator anaeróbio UASB e nos decantadores aeróbios. Os resíduos provenientes do gradeamento são depositados em caçambas e destinados diretamente para o aterro sanitário do município, sem qualquer tratamento prévio, enquanto os resíduos de lodo são desaguados de forma mecânica, para reduzir a umidade e os custos com o transporte, e são destinados para o aterro sanitário.

**Figura 29** - Resíduos do gradeamento grosso depositado em caçamba e destinado para aterro sanitário.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

**Figura 30** - Resíduos do gradeamento fino, com lâminas de 3mm de espaçamento.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

Segundo os dados disponibilizados pelo SeMAE por meio do formulário, a ETE gera anualmente cerca de 21.600 toneladas de resíduos sólidos destinados ao aterro sanitário. Esse volume abrange os resíduos provenientes das etapas de tratamento, incluindo a areia (com média de 223,5 t/mês), o material de gradeamento grosso (2,8 t/mês), o material de gradeamento fino (11,1 t/mês) e, principalmente, o lodo desaguado, que corresponde à maior parte, com aproximadamente 1.569,5 t/mês. Em 2023, o lodo desaguado apresentou teor médio de sólidos variando entre 20% e 25% após passar pelo processo de centrifugação.

**Figura 31** - Sistema lateral de remoção do lodo do Reator UASB.

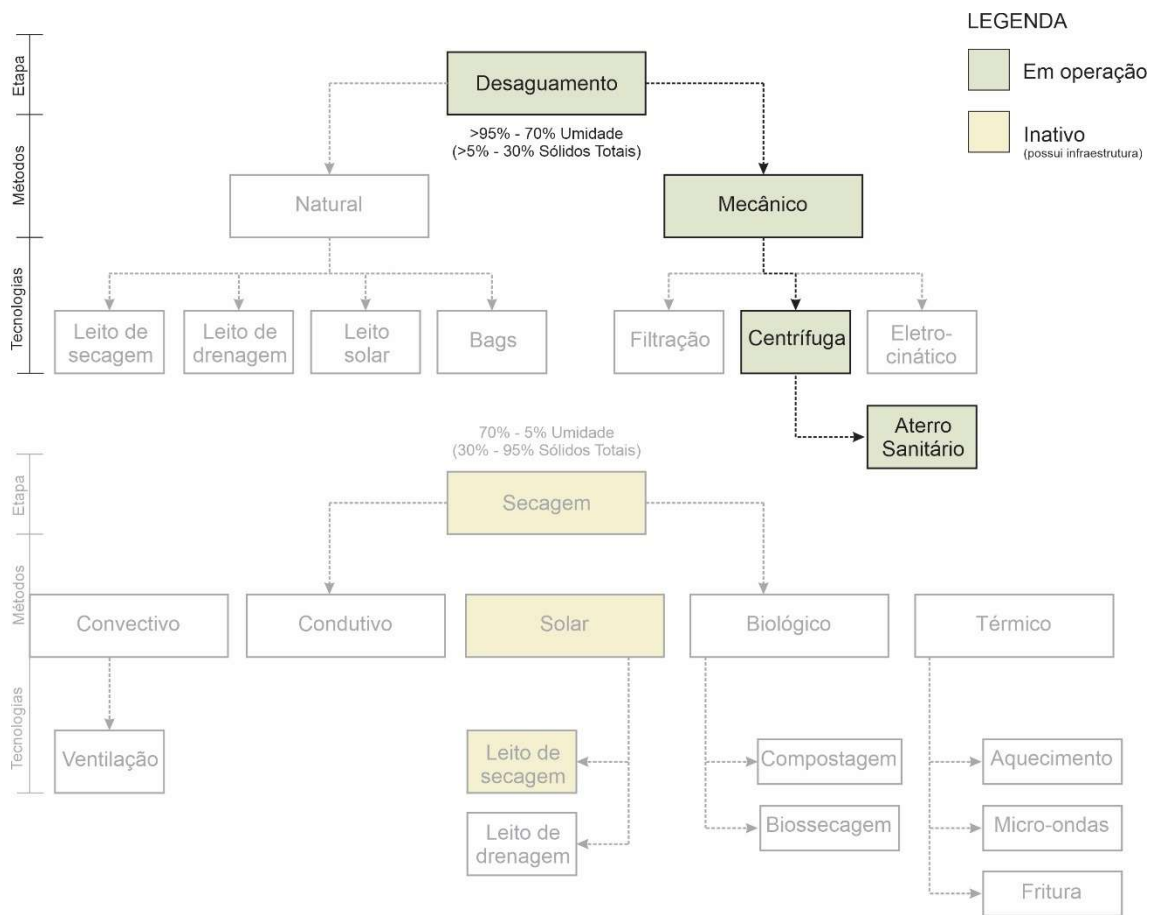


Fonte: Acervo da autora, 2025.

Reis (2017) relata em sua pesquisa que o tratamento do lodo de esgoto tem início com o adensamento, etapa responsável por reduzir o volume ou aumentar a concentração do lodo. Em seguida, ocorre a digestão, processo que visa à estabilização do material. Na sequência, realiza-se o desaguamento, com o objetivo de aumentar o teor de sólidos, diminuir os custos de transporte, preparar o lodo para a remoção adicional de água por meio da secagem e viabilizar seu aproveitamento ou disposição final em menores volumes. Após o

desaguamento, seja realizado por métodos mecânicos ou naturais, o lodo atinge, em geral, um teor de sólidos totais entre 15% e 30%, pois apenas a água livre e parte da água intersticial são removidas nesse estágio. Na ETE de São José do Rio Preto, o processo de tratamento do lodo consiste no desaguamento mecânico e envio para aterro sanitário, conforme figura 33.

**Figura 32** - Sistema de tratamento do lodo na ETE de São José do Rio Preto.



Fonte: Autora, 2025.

O método de centrifugação é considerado o mais comum para desidratação de lodo. Nesse processo, o lodo é colocado em uma centrífuga decantadora, onde a força centrífuga resultante do movimento giratório pressiona o resíduo contra as paredes do equipamento. Um transportador em formato de parafuso é responsável por remover o lodo compactado ao longo da parede na extremidade da centrífuga (Reis, 2017).

Durante a visita, foi possível observar a estrutura existente de um galpão de secagem para o lodo, porém o técnico informou que atualmente está inativado, mesmo sabendo dos benefícios do leito de secagem do lodo, que segundo Reis (2017) essa etapa adicional com maior aplicação de energia sobre as partículas, conhecida como secagem do lodo, pode reduzir ainda mais a umidade e evitar gastos com transporte e destinação final desse resíduo.

**Figura 33** - Galpão existe de secagem do lodo inativo.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

**Figura 34** - Lodo removido do reator UASB.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

**Figura 35** - Lodo desaguado após processo mecânico na centrífuga.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

**Figura 36** - Efluente tratado.



Fonte: Acervo da autora, 2025.

Após as etapas de tratamento, o efluente passa pelo processo de desinfecção e, em seguida, é lançado no corpo hídrico receptor, o Rio Preto, em conformidade com a Resolução CONAMA nº 357/2005, que estabelece a classificação dos corpos d'água e os padrões de lançamento de efluentes, e com a Resolução CONAMA nº 430/2011, que complementa e atualiza as diretrizes da norma anterior ao detalhar as condições e padrões para o lançamento de efluentes (SeMAE,2024).

Na ETE de São José do Rio Preto, o efluente tratado pode ser visualizado na Figura 27. Já as Tabelas 4 e 5 apresentam os dados obtidos por meio do formulário de requisição, organizados em categorias quantitativas e qualitativas, relacionadas tanto ao sistema de tratamento quanto aos resíduos gerados.

**Tabela 04** – Dados quantitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 02).

**Dados quantitativos da ETE**

Capacidade de tratamento na ETE	1340L/s (segundo dados de 2023 a operação é de 1158L/s)
Consumo energético	10.540.241kWh, custo de R\$ 8.346.849,64 (dados 2023)
Volume de resíduos destinados a aterro sanitário	21.600 t/ano, sendo areia (223,5 t/mês), gradeamento grosso (2,8 t/mês), gradeamento fino (11,1 t/mês) e de lodo desaguado (1569,5 t/mês).

Fonte: SeMAE, 2024.

**Tabela 05** – Dados qualitativos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 02).

**Dados qualitativos da ETE**

Sistema de tratamento	Tratamento biológico por Reatores anaeróbios do tipo UASB seguido de Lodos Ativado Convencional. O efluente final é desinfectado antes do lançamento no corpo hídrico receptor.
-----------------------	---

### Dados qualitativos da ETE

Análise do esgoto bruto até o efluente tratado	A ETE realiza amostragem composta por DBO, DQO, série de sólidos, série nitrogenada, entre outros parâmetros.
Formas de tratamento do lodo	Desaguamento mecânico por centrífuga do tipo decanter, elevando o teor de sólidos de aproximadamente 1,7% para 22%, antes do envio para aterro sanitário.
Produtos químicos utilizados	Polímeros de alto peso molecular para desidratação de lodo; cloro gasoso e hipoclorito de sódio para desinfecção

Fonte: SeMAE, 2024.

O lodo passa por desaguamento mecânico em centrífugas, processo que eleva o teor de sólidos de aproximadamente 1,7% para cerca de 22% antes do envio ao aterro sanitário. A ETE realiza análises referentes ao teor de sólidos nas massas úmida e seca. Na tabela a seguir, a média corresponde a duas coletas diárias realizadas ao longo de 2024, sendo a primeira às 8h e a segunda às 14h. O “teor da torta” refere-se ao material após a centrifugação, já condicionado com polímero, enquanto o “teor do lodo” representa o lodo bruto (SeMAE,2024).

**Tabela 06** – Dados quantitativos do teor de sólidos coletados através do formulário de requisição de dados (apêndice 02).

#### Média % de teor de sólidos

Teor lodo	Teor torta
1,70%	21,72%

Fonte: SeMAE, 2024.

Além disso, a ETE realiza mensalmente análises ambientais do lodo para verificar o atendimento aos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. Nos relatórios emitidos ao longo de 2024 pelo laboratório Ecosystem, todos os parâmetros avaliados permaneceram dentro dos limites definidos pela referida resolução.

### **5.3.1. Fluxograma do sistema de tratamento de esgoto**

Assim como na ETA, o ciclo de vida do tratamento de esgoto foi mapeado com base nos dados fornecidos pelo SeMAE (2024). O esgoto gerado nas edificações é conduzido até a ETE por meio do sistema de coleta, que inclui a rede coletora, os coletores-tronco e os interceptores. A chegada do esgoto à estação ocorre por meio de uma estação elevatória de esgoto bruto e, a partir desse ponto, todo o transporte dentro da ETE é realizado por gravidade. Vale ressaltar que o lodo e água de lavagem dos filtros, provenientes do sistema de tratamento da ETA também chegam até a ETE por meio de interceptores nas redes de coleta (SeMAE,2024).

A primeira etapa do tratamento é o gradeamento, responsável pela remoção de sólidos grosseiros presentes no esgoto bruto. Essa etapa é dividida em dois estágios: o gradeamento grosso, com espaçamento de 4 cm entre as grades, destinado à retenção de resíduos maiores; e o gradeamento fino, com aberturas de 3 mm, que retém partículas menores em suspensão e areia. Após a segregação de partículas maiores, o esgoto segue para o desarenador, onde ocorre a retenção de areia e sólidos finos e então é encaminhado para o reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB) para tratamento biológico, onde fica cerca de 8h e remove cerca de 70% da matéria orgânica (SeMAE,2024).

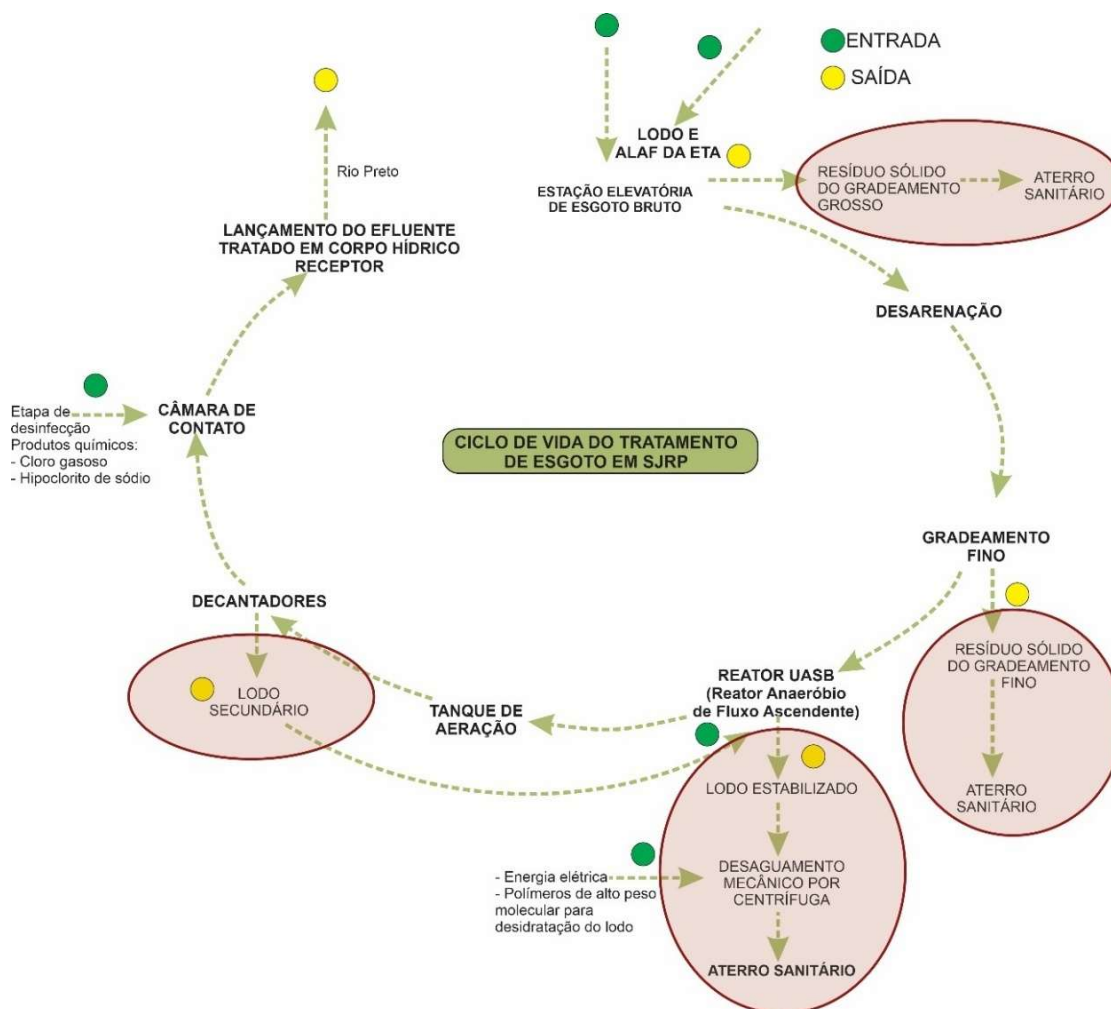
Segundo Silva (2019), o reator UASB é um sistema que promove a separação das fases sólida, líquida e gasosa por meio do fluxo ascendente do esgoto através de um leito de lodo denso e altamente ativo, responsável pela estabilização anaeróbia da matéria orgânica. Acima da manta de lodo, dispositivos específicos são utilizados para separar os gases gerados, principalmente o metano, e permitir a sedimentação dos sólidos remanescentes. Em São José do Rio Preto, a ETE opera com 4 reatores UASB para tratar 100% do esgoto coletado (Conjuntura Econômica, 2024).

Após o tempo necessário para eliminar parte da matéria orgânica, o efluente é enviado para o tanque de aeração e decantação, para a remoção de partículas por gravidade do tratamento aeróbico. Nesta etapa é gerado o lodo secundário, que retorna ao reator UASB e sai estabilizado (SeMAE, 2024). O efluente então, segue para a etapa de desinfecção, com adição de produtos

químicos e é lançado no corpo hídrico receptor de acordo com a legislação vigente.

O lodo final passa por desaguamento mecânico em centrífugas, reduzindo seu teor de umidade, e é posteriormente encaminhado ao aterro sanitário que atende São José do Rio Preto, localizado no município de Onda Verde e operado pela empresa Constroeste (SeMAE,2024).

**Figura 37 - Ciclo de vida do tratamento de esgoto na ETE.**



Fonte: Autora, 2025 (dados SeMAE).

#### 5.4. Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os dados obtidos durante as visitas às estações e por meio dos formulários de requisição referem-se ao ano de 2024 e correspondem à prática atual de geração e destinação dos resíduos do sistema de saneamento. Esses dados foram convertidos para a unidade funcional adotada no estudo de ACV,

definida como 1 kg de lodo, conforme as especificidades de cada processo analisado.

A ABNT NBR ISO 14040 define processo como um conjunto de atividades inter-relacionadas que transformam entradas em saídas ao longo do ciclo de vida (ABNT, 2009a). Na modelagem computacional da ACV, esses processos são operacionalizados por meio de uma referência quantitativa, conforme a lógica adotada pelo software. A Tabela 7 apresenta as entradas e saídas associadas ao Processo 1 – captação e tratamento de água na ETA, que inclui o volume de água bruta captada, as quantidades de produtos químicos utilizados no tratamento e o consumo de energia elétrica, que abrange tanto o sistema de recalque da captação quanto o consumo total da estação.

Para a conversão dos dados à unidade funcional, adotou-se como saída de referência o volume anual de lodo e água de lavagem dos filtros gerado no processo de tratamento de água, correspondente a 528.000 m<sup>3</sup>/2024 (SeMAE,2024). Para adequação da unidade de funcional definida no estudo, o volume em m<sup>3</sup> foi convertido para Kg utilizando a densidade de 1000 kg/m<sup>3</sup>, totalizando 528.000.000 Kg de lodo e água de lavagem dos filtros. Dessa forma, os fluxos anuais de entrada, como consumo de água bruta, insumos químicos e energia elétrica, apresentados na coluna “dato primário” da tabela 07, foram normalizados por meio da divisão de seus valores totais anuais pelo volume anual de lodo e água de lavagem gerado. Esse procedimento permitiu expressar os resultados em termos de consumo por unidade de lodo gerado, resultando nos indicadores apresentados na coluna “quantidade/UF”.

O inventário do Processo 1 indica que o lodo e a água de lavagem dos filtros gerados na ETA apresentam caráter altamente diluído, com elevado teor de umidade. A normalização dos fluxos pela unidade funcional de 1 kg de lodo evidencia que a geração do resíduo está associada a grandes volumes de água processada, enquanto a fração sólida corresponde a uma parcela pequena.

Entre os insumos químicos utilizados no tratamento, o cloreto férrico e o hidróxido de cálcio apresentaram os maiores consumos específicos por unidade de lodo gerado. Os demais insumos e o consumo de energia elétrica apresentaram valores reduzidos quando normalizados por kg de lodo.

**Tabela 07** – Inventário do processo 1 (captação e tratamento de água).

<b>PROCESSO 1 - CAPTAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUA</b>					
<b>ENTRADA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE / UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
Água Bruta	m³/ano	10741433	Captação água	0,02034	M³/Kg de lodo
Hipoclorito de Sódio	kg/ano	1020463	Tratamento	0,00193	Kg/Kg de lodo
Ácido Fluossilícico	kg/ano	34322	Tratamento	0,00007	Kg/Kg de lodo
Ácido Sulfúrico	kg/ano	44070	Tratamento	0,00008	Kg/Kg de lodo
Purate (Clorito sódio+Peróxido hidrogênio)	kg/ano	34933	Tratamento	0,0007	Kg/Kg de lodo
Carvão Ativado (CAP)	kg/ano	22825	Tratamento	0,00004	Kg/Kg de lodo
Ortopolifosfato de Sódio	kg/ano	28218	Tratamento	0,00005	Kg/Kg de lodo
Cloreto Férrico	kg/ano	699693	Tratamento	0,00133	Kg/Kg de lodo
Hidróxido de Cálcio	kg/ano	627748	Tratamento	0,00119	Kg/Kg de lodo
Cal Hidratada	kg/ano	4000	Tratamento	0,00001	Kg/Kg de lodo
Energia Elétrica	Kwh/ano	17693	Tratamento	0,00003	Kwh/Kg de lodo
<b>SAÍDA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE / UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
<b>Lodo e Água de Lavagem dos Filtros</b>	<b>Kg/ano</b>	<b>528000000</b>	<b>Resíduo</b>	<b>1,00000</b>	<b>Kg/Kg de lodo</b>
Água Tratada	m³/ano	10405432	Produto final	0,01971	M³/Kg de lodo

Fonte: SeMAE, 2024.

O Processo 2 corresponde à etapa de tratamento de esgoto na ETE, tendo como fluxo de referência a geração do lodo bruto. A modelagem do processo seguiu a mesma abordagem metodológica adotada no Processo 1, com a identificação das entradas e saídas associadas ao tratamento do esgoto e a normalização dos fluxos em relação à unidade funcional de 1 kg de lodo.

Os dados utilizados referem-se ao ano de 2024 e foram obtidos por meio de formulários de requisição junto à autarquia municipal. As entradas consideradas no inventário incluem o volume de esgoto bruto, o lodo e a água de lavagem dos filtros provenientes da ETA e o consumo de energia elétrica associado às etapas de tratamento.

O volume de lodo bruto gerado na ETE não foi disponibilizado diretamente pelo SeMAE, somente o volume de lodo desaguado e percentual de sólidos foi disponibilizado. Dessa forma, sua estimativa foi realizada com base no teor médio de sólidos do lodo bruto, correspondente a 1,70% (SeMAE,2024). A partir da massa de sólidos determinada e adotando-se o princípio da conservação de sólidos entre as etapas do processo, estimou-se uma massa anual de lodo bruto de 240.521.259 kg, conforme descrito na literatura técnica de tratamento de esgotos (Von Sperling, 2005):

*Massa total de sólidos do lodo desaguado: 18834000 Kg/ano*

*Teor de sólidos torta: 21,71% = 0,2171*

*Teor de sólidos lodo bruto: 1,70% = 0,017*

*M sólidos torta = 18834000 x 0,2171 = 4 088 861,4 Kg/ano*

*M bruto = M sólidos torta/0,017 = 240 521 259 Kg/ano*

Essa abordagem permitiu a compatibilização dos dados disponíveis com a unidade funcional adotada, viabilizando a modelagem do inventário do Processo 2.

Entre as saídas do processo, o lodo bruto constitui o principal fluxo de interesse, sendo encaminhado para a etapa subsequente de desaguamento. O rejeito do gradeamento também foi considerado no inventário, apresentando valor reduzido quando normalizado pela unidade funcional. Os fluxos de efluente tratado e emissões atmosféricas provenientes do tratamento anaeróbico foram reconhecidos como existentes no processo; entretanto, não foram incluídos na

modelagem do inventário devido à ausência de dados primários disponibilizados pela autarquia, caracterizando uma limitação do estudo.

A Tabela 8 apresenta as entradas e saídas associadas ao Processo 2, bem como os respectivos indicadores normalizados pela unidade funcional, permitindo a análise quantitativa da contribuição dessa etapa para o sistema de gestão do lodo.

Os dados de consumo de energia elétrica disponibilizados pelo SeMAE não apresentam segregação entre o consumo associado às etapas de tratamento do esgoto e aquele referente ao desaguamento do lodo, realizado por meio de centrífuga mecânica. Dessa forma, o consumo total de energia elétrica, expresso em kWh, foi integralmente atribuído à etapa de tratamento.

Os resíduos do gradeamento são gerados nas etapas preliminares do tratamento de esgoto, compreendendo o gradeamento grosso, o gradeamento fino e a remoção de areia. Esses resíduos são classificados como rejeitos e destinados diretamente ao aterro sanitário.

**Tabela 08** – Inventário do processo 2 (Tratamento de esgoto).

<b>PROCESSO 2 - TRATAMENTO DE ESGOTO</b>					
<b>ENTRADA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE/UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
<b>Lodo e Água de Lavagem</b>	<b>Kg/ano</b>	<b>528000000</b>	<b>Resíduo ETA</b>	<b>2,1952</b>	<b>Kg/Kg lodo</b>
Esgoto bruto	m³/ano	36018465	Tratamento	0,1498	M³/Kg lodo
Energia Elétrica	Kwh/ano	10540241	Tratamento	0,0438	Kwh/Kg lodo
<b>SAÍDA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE/UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
<b>Lodo Bruto</b>	<b>kg/ano</b>	<b>240521259</b>	<b>Resíduo</b>	<b>1,0000</b>	<b>Kg/Kg lodo</b>
Rejeito Gradeamento	kg/ano	284880	Rejeito	0,0012	Kg/Kg lodo
Efluente Tratado	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>
Emissões Atmosféricas	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>	<i>Não disponibilizado</i>

Fonte: SeMAE, 2024.

O Processo 3 corresponde à etapa de desaguamento do lodo bruto, realizada por meio de centrifugação mecânica. Essa etapa tem como principal função a redução do teor de umidade do lodo, visando à diminuição do volume a ser transportado e dos custos associados à destinação final.

O lodo bruto, com teor médio de sólidos de 1,70%, é submetido ao processo de desaguamento, resultando na formação do lodo desaguado (torta), com teor médio de sólidos de 21,71%. A massa anual de lodo desaguado encaminhada para a etapa subsequente foi de 18.834.000 kg (SeMAE,2024).

A quantidade de água removida no processo foi estimada pela diferença entre a massa total de lodo bruto e a massa de lodo desaguado, totalizando 221.687.259 kg/ano. Essa estimativa baseia-se no princípio da conservação de sólidos entre as etapas do processo, assumindo-se que a massa de sólidos permanece constante durante o desaguamento.

Além do lodo bruto, o processo considera a aplicação de polímeros como insumo auxiliar, utilizados para favorecer a separação sólido-líquido. A Tabela 9 apresenta as entradas e saídas associadas ao Processo 3, bem como os respectivos indicadores normalizados pela unidade funcional de 1 kg de lodo.

Por fim, o Processo 4 refere-se ao transporte e à disposição final do lodo desaguado em aterro sanitário, representando a etapa final do cenário 1 analisado neste estudo. O lodo desaguado gerado após a centrifugação é encaminhado para aterro localizado em município vizinho à ETE (Onda Verde/SP), a uma distância aproximada de 17 km (SeMAE,2024).

Segundo o SeMAE, o transporte ocorre por meio de caminhões com capacidade de carga de 1.500 kg. Com base na massa anual de lodo desaguado de 18.834.000 kg, estimou-se a necessidade de 12.556 viagens por ano. A distância total percorrida por viagem foi considerada como 34 km, correspondendo ao trajeto de ida (cheio) e volta (vazio), resultando em uma quilometragem total anual de 426.904 km (SeMAE,2024).

A Tabela 10 apresenta os dados de inventário correspondentes ao Processo 4.

**Tabela 09** – Inventário do processo 3 (desaguamento do lodo).

<b>PROCESSO 3 – DESAGUAMENTO DO LODO</b>					
<b>ENTRADA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE/UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
Lodo Bruto	kg/ano	240521259	Resíduo ETE	12,7706	Kg/Kg lodo
Polímeros	Kg/ano	60000	Tratamento lodo	0,0032	Kg/Kg lodo

<b>SAÍDA</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE/UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
Água removida	kg/ano	221687259	Tratamento lodo	11,7706	Kg/Kg lodo
Lodo desaguado	kg/ano	18834000	Tratamento lodo	1,0000	Kg/Kg lodo

Fonte: SeMAE, 2024.

**Tabela 10** – Inventário do processo 4 (transporte e destinação do lodo em aterro sanitário).

<b>PROCESSO 4 – TRANSPORTE E DESTINAÇÃO DO LODO EM ATERRO SANITÁRIO</b>					
<b>ENTRADA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE/UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
Lodo desaguado	kg/ano	18834000	Resíduo	0,5229	Kg/Kg lodo
Transporte	Km/ano	426904	Transporte	0,0227	Km/Kg lodo

<b>SAÍDA</b>	<b>UNIDADE (DADO PRIMÁRIO)</b>	<b>QUANTIDADE</b>	<b>ETAPA</b>	<b>QUANTIDADE/UF</b>	<b>UNIDADE (FINAL)</b>
Lodo desaguado	18834000	kg/ano	Resíduo	1,000	Kg/Kg lodo

Fonte: SeMAE, 2024.

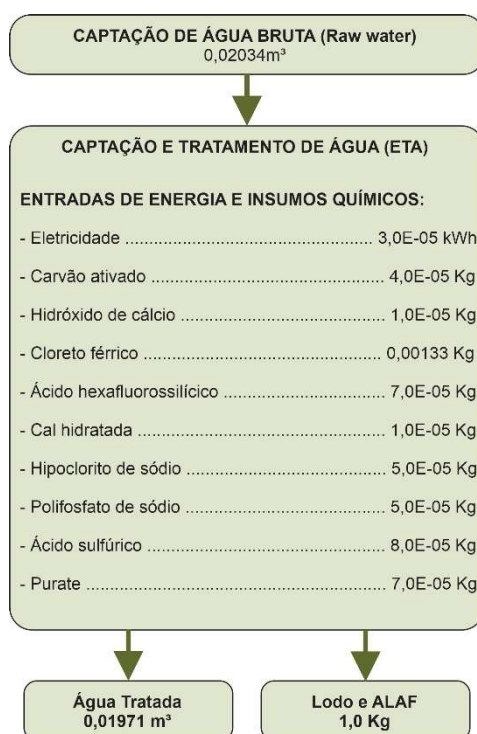
### 5.4.1. Modelagem dos fluxos e processos do ICV

A modelagem dos fluxos e processos do ICV foi realizada no *software* *OpenLCA* (versão 2.4.1), utilizando a base de dados gratuita ELCD 3.2. Seguindo o mesmo procedimento, foi criado um processo unitário para cada etapa do sistema analisado com a referência quantitativa correspondente à unidade funcional do estudo, estabelecida como 1 kg de lodo.

Sempre que possível, os fluxos de entrada foram vinculados a inventários existentes na base de dados ELCD 3.2, de modo a garantir a utilização de dados consolidados de ciclo de vida. Entretanto, alguns insumos químicos específicos utilizados nas estações de tratamento não estavam disponíveis na base selecionada. Nesses casos, os fluxos foram cadastrados manualmente no *OpenLCA*, com a finalidade de representar adequadamente a operação real do sistema e manter a coerência do inventário.

A Figura 38 apresenta a tela do *software* com as entradas e saídas do processo “Captação e Tratamento de Água”, exemplificando a estrutura adotada para a modelagem dos dados no *OpenLCA*.

**Figura 38** – Entradas e saídas do Processo 1 - Captação e tratamento de água modelado no *software* *OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

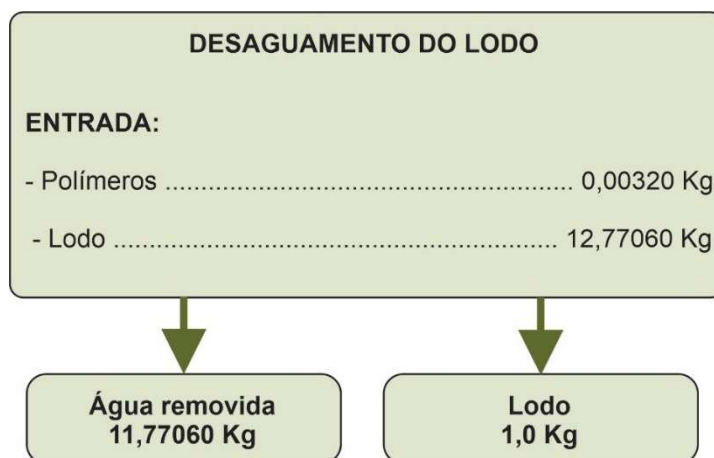
A Figura 39 apresenta as entradas e saídas do Processo 2 – tratamento de esgoto, conforme a modelagem realizada no *software* OpenLCA e ss figuras 40 e 41 representam os Processos 3 (desaguamento do lodo) e 4 (transporte e destinação final do lodo em aterro), conforme o mesmo procedimento.

**Figura 39** - Entradas e saídas do Processo 2 - Tratamento de esgoto modelado no *software* OpenLCA.



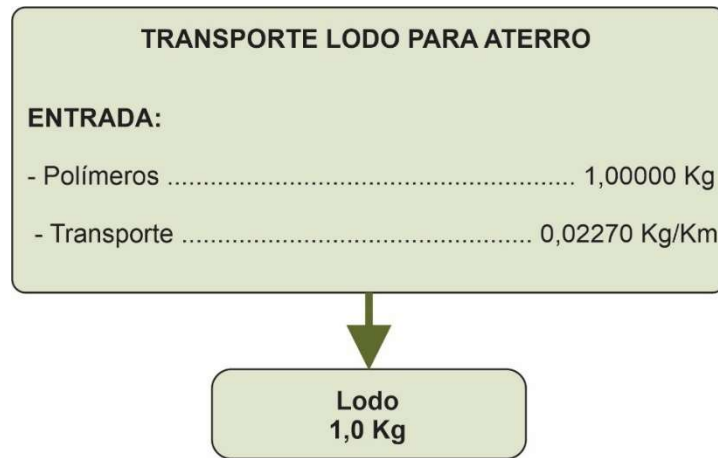
Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE,2024.

**Figura 40** - Entradas e saídas do Processo 3 - Desaguamento do lodo modelado no *software* OpenLCA.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE,2024.

**Figura 41** - Entradas e saídas do Processo 4 - Transporte e destinação final do lodo em aterro modelado no *software OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

### 5.5. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Os métodos de AICV são fundamentais na ACV, pois permitem quantificar os potenciais impactos ambientais associados a produtos, processos ou serviços. Esses métodos operam a partir dos dados obtidos na fase de inventário, convertendo-os em indicadores ambientais representativos e comparáveis, que subsidiam a interpretação dos resultados e a tomada de decisão (Greendelta, 2025).

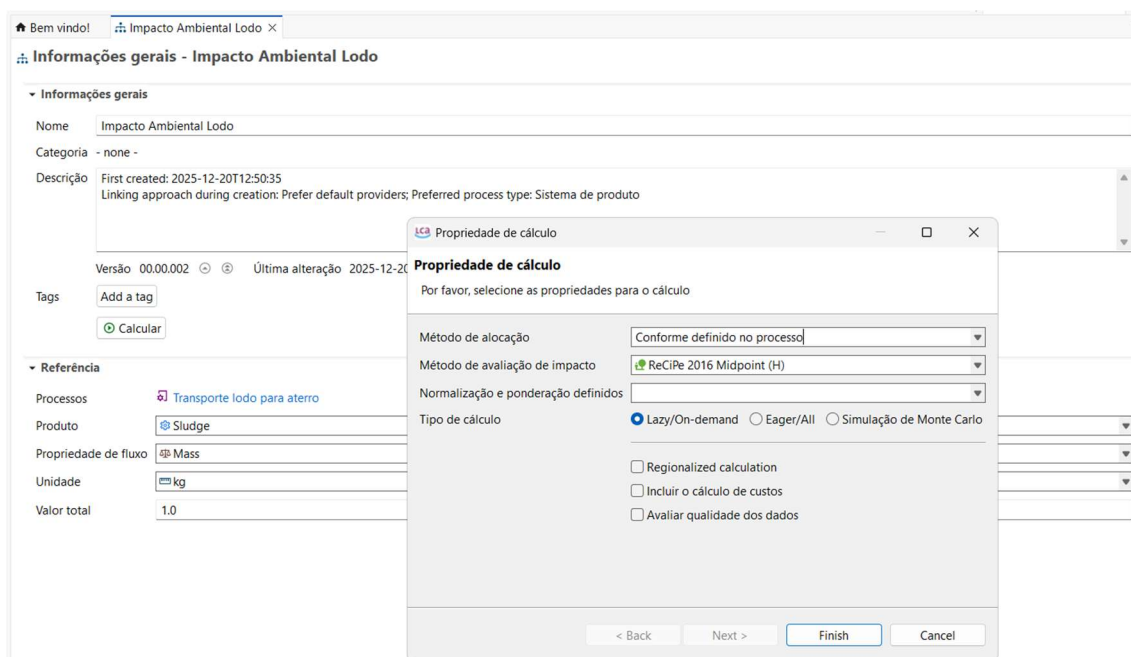
A etapa de AICV foi conduzida conforme as diretrizes das normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044. A classificação e a caracterização dos processos do inventário foram realizadas com o auxílio do *software OpenLCA* (versão 2.4.1), utilizando o método ReCiPe 2016, com abordagem *midpoint* (H). Foram selecionadas apenas as categorias consideradas essenciais para a análise do lodo de ETE considerando os resultados identificados nos estudos incluídos na revisão sistemática, que são: Mudanças Climáticas, Eutrofização de Água Doce, Toxicidade Humana não carcinogênica, Ecotoxicidade Terrestre e Escassez de Recursos Fósseis.

Após a modelagem individual dos processos que compõem o sistema de tratamento na etapa de ICV conforme a unidade funcional definida, foi realizada a criação do sistema produto no *software OpenLCA*. O sistema produto foi

estruturado de forma a integrar todos os processos modelados, os quais foram interligados por meio do fluxo de referência comum, correspondente ao lodo gerado ao longo do sistema (fluxo em destaque em todos os processos modelados). Dessa forma, o lodo foi adotado como elemento central de conexão entre as etapas do sistema, garantindo o encadeamento dos processos e a rastreabilidade dos fluxos de massa e energia associados.

A partir da consolidação do sistema produto, procedeu-se o cálculo dos impactos ambientais, permitindo a avaliação integrada dos potenciais impactos associados ao ciclo de vida do lodo de ETE, de acordo com as categorias de impacto selecionadas, mencionadas acima, conforme apresentados na tabela 11.

**Figura 42** - Tabela de propriedades do cálculo para avaliação de impacto pelo método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) no software *OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

**Tabela 11** – Resultados por categorias de impacto da AICV para 1 kg de lodo de ETE, com aplicação do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) no *software OpenLCA*.

<b>Categoria de impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resultado</b>
Mudanças Climáticas ( <i>Global warming</i> )	kg CO <sub>2</sub> eq	2,58
Eutrofização de Água Doce ( <i>Freshwater eutrophication</i> )	kg P eq	9,37 × 10 <sup>-6</sup>
Toxicidade Humana não carcinogênica ( <i>Human non-carcinogenic toxicity</i> )	kg 1,4-DCB eq	0,24
Ecotoxicidade Terrestre ( <i>Terrestrial ecotoxicity</i> )	kg 1,4-DCB eq	1,44
Escassez de Recursos Fósseis ( <i>Fossil resource scarcity</i> )	kg oil eq	0,64

Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

A categoria Mudanças Climáticas apresentou resultado de 2,58 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de lodo, indicando o potencial de contribuição do sistema avaliado para o aquecimento global. Esse impacto está relacionado às emissões de gases de efeito estufa, tais como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>), entre outros, que intensificam a absorção e a retenção da radiação infravermelha na atmosfera, reduzindo a dissipação de calor para o espaço. O aumento das concentrações desses gases contribui para o agravamento do efeito estufa e para a elevação da temperatura média da superfície terrestre (Gutierrez, 2014). No contexto do sistema analisado, esse impacto está associado, principalmente, ao consumo de energia elétrica e às etapas de transporte envolvidas no manejo do lodo ao longo do processo. Segundo Huang et al. (2023), os resultados de sua AICV indicam que as principais emissões associadas ao tratamento de esgoto decorrem do consumo de energia elétrica e do uso de produtos químicos.

Para a categoria Eutrofização de Água Doce, observou-se um valor de 9,37 × 10<sup>-6</sup> kg P eq, refletindo o potencial impacto relacionado à presença de

nutrientes no lodo. A unidade “kg P eq” corresponde a quilogramas de fósforo equivalente, utilizada para expressar o potencial de eutrofização de água doce no método ReCiPe 2016.

A Toxicidade Humana não carcinogênica apresentou resultado de 0,24 kg 1,4-DCB eq, indicando o potencial de efeitos adversos à saúde humana decorrentes da exposição a substâncias tóxicas ao longo do ciclo de vida do lodo, incluindo compostos químicos e metais associados às etapas de tratamento e disposição. A unidade “kg 1,4-DCB eq” corresponde à substância de referência adotada pelo método ReCiPe 2016 para expressar o potencial de toxicidade humana, representando uma equivalência de impacto e não a presença real de diclorobenzeno no sistema (Huijbregts, et. al. 2017). Já a categoria Ecotoxicidade Terrestre apresentou valor de 1,44 kg 1,4-DCB eq, evidenciando o potencial impacto do lodo sobre organismos terrestres, especialmente em cenários de disposição final, como aterros sanitários ou aplicação no solo. O efeito do tratamento de esgoto na categoria de danos aos ecossistemas é atribuído principalmente aos elevados impactos associados ao uso do solo, à acidificação terrestre e à ecotoxicidade terrestre, os quais resultam em danos diretos às espécies e aos habitats terrestres (Chaouali, Muchangos e Tokai, 2024).

Segundo Chaouali, Muchangos e Tokai (2024), a disposição de lodo em aterros sanitários e o tratamento de esgoto figuram entre as principais fontes de emissões, sendo que o CH<sub>4</sub> proveniente desses processos contribui significativamente para o aquecimento global e para a toxicidade humana, tanto carcinogênica quanto não carcinogênica, podendo intensificar problemas de saúde, como desnutrição e diversas doenças.

Por fim, o impacto associado à Escassez de Recursos Fósseis foi de 0,64 kg oil eq, estando relacionado principalmente ao consumo de combustíveis fósseis nas etapas operacionais e de transporte do lodo. A unidade “kg oil eq” corresponde à equivalência em óleo adotada pelo método ReCiPe 2016 para expressar o uso de diferentes combustíveis fósseis em uma base comum (Huijbregts, et. al. 2017).

Ressalta-se que os valores obtidos não correspondem a impactos ambientais reais ou mensurados no meio ambiente, mas sim a potenciais impactos, calculados a partir de fatores de caracterização do método ReCiPe

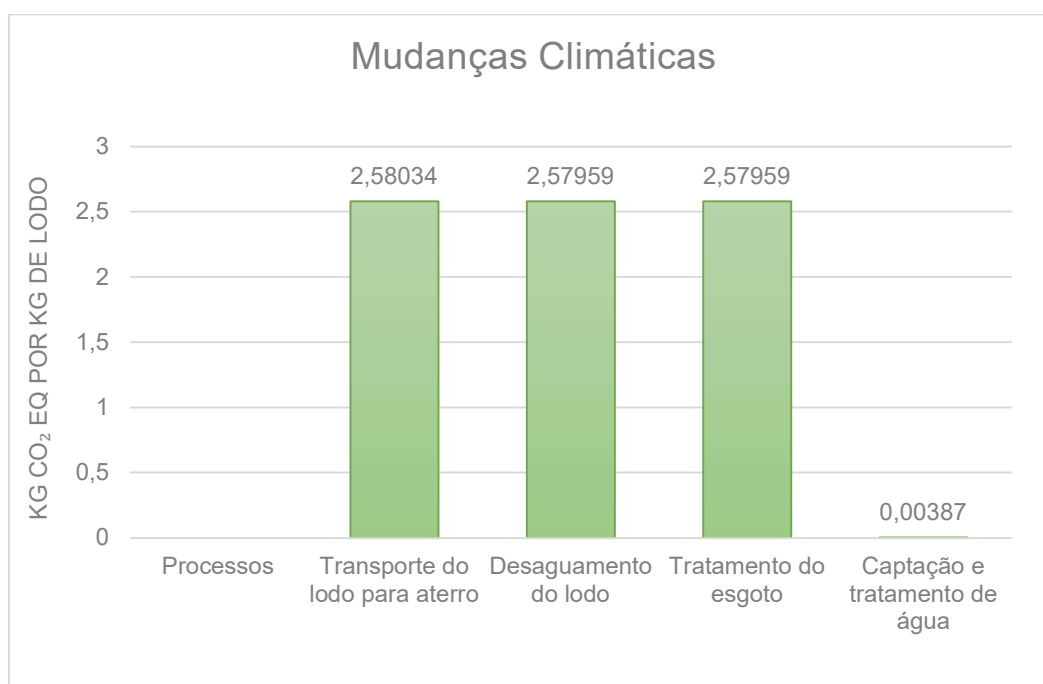
2016, na abordagem *midpoint* (H). Dessa forma, cada resultado indica a magnitude relativa da contribuição do lodo para uma determinada categoria de impacto, dentro do escopo e das premissas estabelecidas para o estudo.

### 5.5.1. Análise de contribuição dos processos

A análise de contribuição apresenta de forma detalhada a participação dos processos nos fluxos e nas categorias de impacto, considerando os totais a montante. Essa ferramenta possibilita identificar, para cada fluxo, os processos aos quais está associado e analisar em cada categoria de impacto quais processos são responsáveis pelos impactos gerados, bem como sua respectiva contribuição percentual (Greendelta, 2025).

A Figura 44 apresenta os resultados da análise de contribuição para a categoria de impacto Mudanças Climáticas (*Global warming*). O processo “Transporte do lodo para aterro” aparece como o processo de referência do sistema produto e, por essa razão, concentra 100% da contribuição total.

**Figura 43-** Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Mudanças Climáticas com aplicação do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) no software *OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

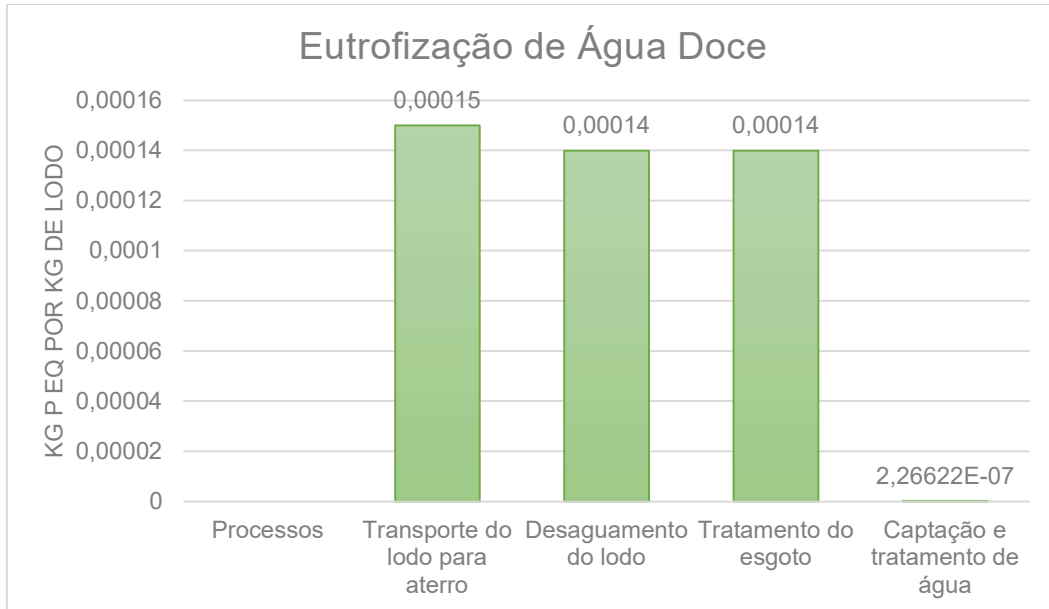
O impacto total de 2,58 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de lodo está predominantemente associado às etapas de tratamento do esgoto e desaguamento do lodo, que concentraram aproximadamente 99,97% da contribuição total do sistema. Chaouali, Muchangos e Tokai (2024) relatam, a partir dos resultados da ICV de uma ETE na Tunísia, que a maior contribuição para o impacto ambiental total do sistema corresponde ao processo de tratamento de esgoto, com 42,30%, seguido pela disposição do lodo em aterro, com 41,40%.

Observou-se que o principal *hotspot* ambiental dessa categoria está relacionado ao consumo de eletricidade da rede, responsável por cerca de 99,82% do impacto climático, evidenciando a forte dependência energética das operações envolvidas na geração e no processamento do lodo. Os processos associados à captação e ao tratamento de água apresentaram baixa contribuição para o impacto total (0,15%), não se configurando como *hotspots* ambientais para essa categoria.

De acordo com Piekarski (2013), os impactos associados à matriz elétrica estão relacionados, principalmente, ao uso de combustíveis de origem fóssil na geração de energia, como derivados de petróleo e gás natural. O autor destaca que os potenciais de impacto dessa categoria decorrem, em grande parte, dos processos de combustão desses recursos, os quais resultam na emissão de compostos capazes de contribuir para a depleção da camada de ozônio, com ênfase para o óxido nitroso e os clorofluorcarbonos (Piekarski, 2013).

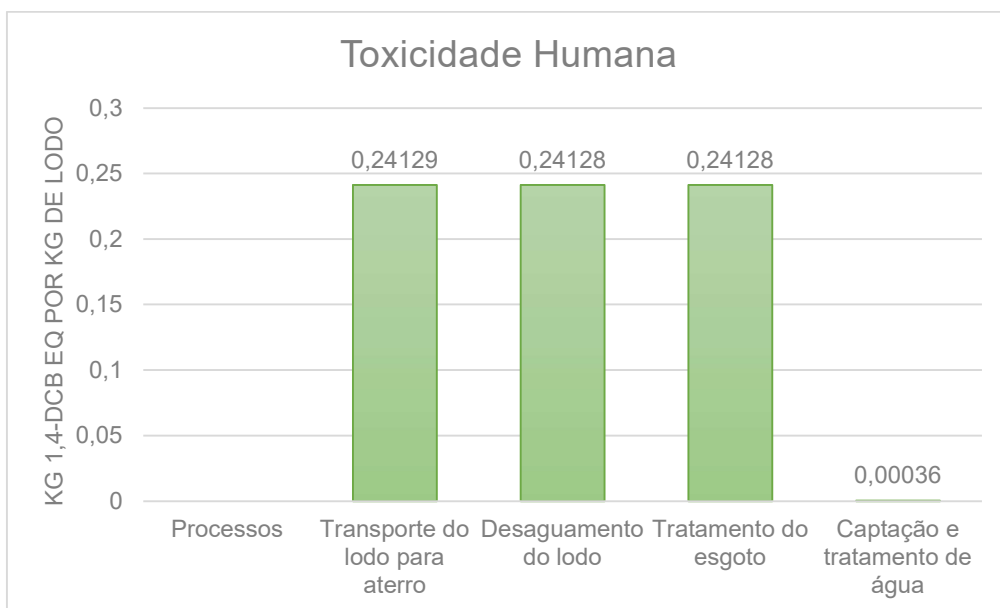
Para a categoria Eutrofização de Água Doce (*Freshwater eutrophication*), a análise de contribuição evidencia que o impacto está predominantemente associado às etapas de tratamento do esgoto e desaguamento do lodo, as quais concentram praticamente a totalidade da contribuição do sistema, conforme apresentado na Figura 45. Resultado semelhante para a categoria de impacto Toxicidade Humana não carcinogênica (*Human non-carcinogenic toxicity*), cujos resultados indicam a predominância dessas mesmas etapas no perfil de contribuição do sistema (Figura 46).

**Figura 44** - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Eutrofização de Água Doce com aplicação do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) no software *OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

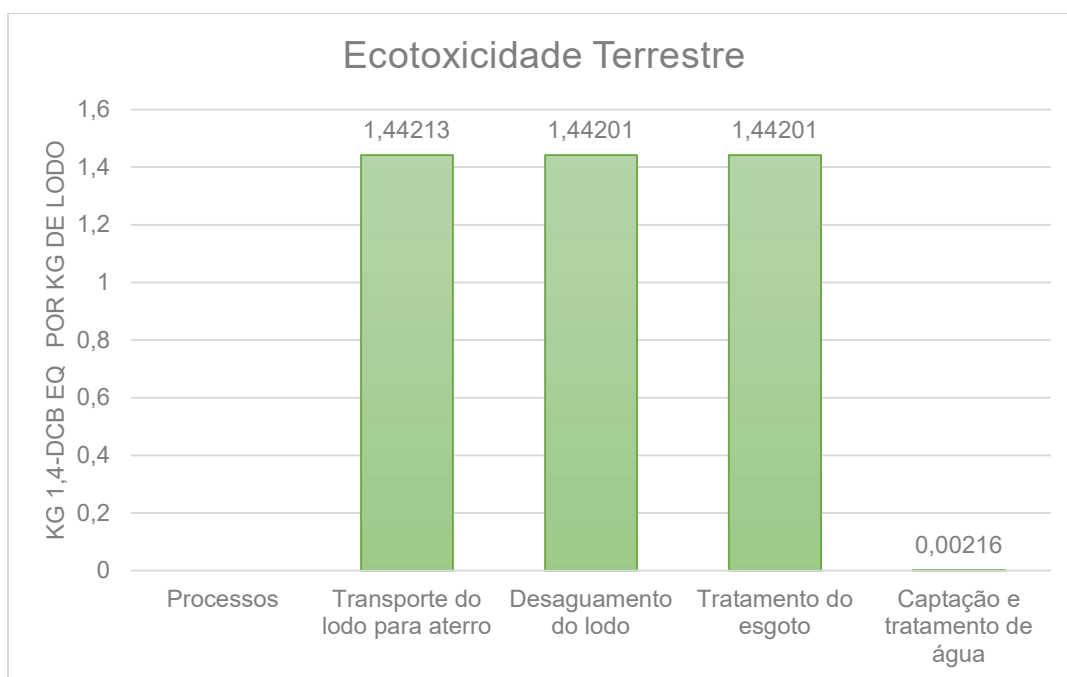
**Figura 45** - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Toxicidade Humana não carcinogênica com aplicação do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) no software *OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

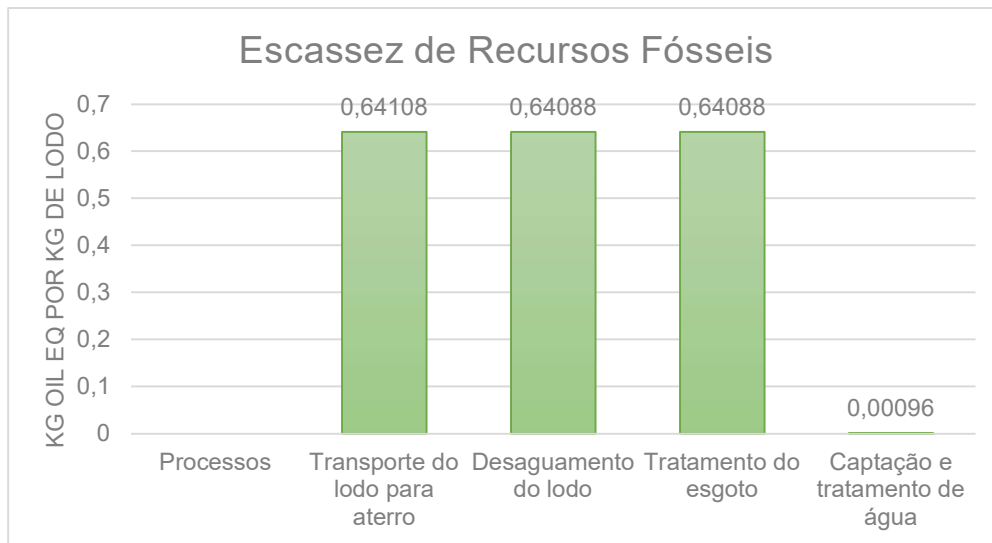
Para as categorias Ecotoxicidade Terrestre (*Terrestrial ecotoxicity*) e Escassez de Recursos Fósseis (*Fossil resource scarcity*), a análise das árvores de contribuição evidenciou padrão semelhante ao observado nas demais categorias avaliadas (Figuras 47 e 48). Em ambos os casos, os impactos estão predominantemente associados às etapas de tratamento do esgoto e desaguamento do lodo, com destaque para o consumo de eletricidade da rede como principal fator responsável pelas contribuições observadas. As etapas de transporte e destinação final do lodo, assim como os processos relacionados à captação e ao tratamento de água, apresentaram contribuição reduzida nessas categorias, não se configurando como *hotspots* ambientais no cenário analisado.

**Figura 46** - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Ecotoxicidade Terrestre com aplicação do método ReCiPe 2016 *Midpoint* (H) no software *OpenLCA*.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

**Figura 47** - Resultados da árvore de contribuição por processos na categoria de impacto Escassez de Recursos Fósseis com aplicação do método ReCiPe 2016 Midpoint (H) no software OpenLCA.



Fonte: *OpenLCA*, 2025. Modelado pela autora com dados do SeMAE, 2024.

Os resultados obtidos estão sujeitos às incertezas inerentes à modelagem da ACV, em função da utilização de dados secundários provenientes de bancos de dados internacionais para a representação dos processos do sistema.

## 5.6. Interpretação dos resultados da ACV

A etapa de interpretação dos resultados da ACV consiste na avaliação crítica das constatações obtidas na fase de ICV e na AICV, considerando o objetivo e o escopo definidos para o estudo (ABNT, 2009b). Nesse contexto, a interpretação dos resultados buscou avaliar o perfil ambiental associado ao manejo do lodo gerado na ETE no cenário atual, a partir da análise dos resultados da AICV e das árvores de contribuição dos processos.

A ETE de São José do Rio Preto apresenta uma geração anual de aproximadamente 18.834.000 kg de lodo desaguado, associada ao tratamento de 36.018.465 m<sup>3</sup> de esgoto, o que resulta em uma razão média de 0,52 kg de lodo desaguado por metro cúbico de esgoto tratado. Esse volume é destinado à disposição final em aterro sanitário, sendo transportado por caminhões com capacidade de 1.500 kg, totalizando 12.556 viagens por ano, considerando-se uma distância média de 34 km por viagem (ida e volta). O consumo anual de

energia elétrica do sistema é de 10.540.241 kWh, equivalente a um consumo específico de 0,29 kWh por metro cúbico de esgoto tratado.

A AICV indicou que, para todas as categorias de impacto consideradas no escopo do estudo, os impactos ambientais do sistema estão predominantemente associados às etapas operacionais do tratamento do esgoto e do desaguamento do lodo. A análise de contribuição evidenciou que o consumo de energia elétrica constitui o principal fator responsável pelos impactos observados, configurando-se como o principal *hotspot* ambiental do sistema no cenário analisado. Segundo Huang et al. (2023), a redução do potencial de emissões de carbono requer a diminuição do consumo de materiais, por meio da seleção de processos de desidratação mais adequados e da otimização das etapas de desidratação.

Observou-se ainda que as categorias de impacto Mudanças Climáticas, Escassez de Recursos Fósseis, Ecotoxicidade Terrestre, Toxicidade Humana não carcinogênica e Eutrofização de Água Doce apresentaram padrões de contribuição semelhantes, com predominância dos processos relacionados ao uso de eletricidade da rede, indicando a forte influência da intensidade energética das operações sobre o perfil ambiental do lodo avaliado.

A identificação do consumo de energia elétrica como principal *hotspot* ambiental do sistema evidencia que ações voltadas à eficiência energética podem representar oportunidades relevantes de melhoria do desempenho ambiental da ETE. Nesse sentido, os resultados da ACV fornecem subsídios técnicos para a tomada de decisão por parte do gestor do sistema, ao indicar que intervenções operacionais ou tecnológicas associadas à redução do consumo de energia elétrica têm potencial para mitigar impactos em múltiplas categorias ambientais simultaneamente.

Embora o transporte e a destinação final do lodo não tenham apresentado o principal *hotspot* ambiental do sistema, esses processos possuem relevância sob a perspectiva da gestão operacional da empresa. A disposição final do lodo em aterro sanitário envolve grandes volumes de resíduos e, conseqüentemente, está associada a custos operacionais elevados. Ressalta-se, contudo, que a avaliação econômica não integrou o escopo deste estudo, sendo essa observação apresentada de forma qualitativa, como subsídio para análises futuras que considerem de maneira integrada os aspectos ambientais e econômicos do manejo do lodo.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados da AICV, conduzida com o método ReCiPe 2016 (*midpoint*) e com auxílio do *software* OpenLCA, verificou-se que os impactos ambientais do sistema de tratamento de São José do Rio Preto estão predominantemente associados às etapas operacionais do tratamento do esgoto e do desaguamento do lodo. A análise de contribuição evidenciou que o consumo de energia elétrica da rede constitui o principal fator responsável pelos impactos observados, configurando-se como o principal *hotspot* ambiental do sistema nas categorias de impacto Mudanças Climáticas, Escassez de Recursos Fósseis, Ecotoxicidade Terrestre, Toxicidade Humana não carcinogênica e Eutrofização de Água Doce.

Os resultados obtidos evidenciam a relevância da ACV como ferramenta de apoio à gestão ambiental dos resíduos do saneamento, ao permitir a identificação de processos críticos e oportunidades de melhoria ao longo do sistema de tratamento.

Ressalta-se que os resultados deste estudo devem ser interpretados à luz de algumas limitações, tais como a indisponibilidade de dados primários segregados para determinadas etapas do sistema, a necessidade de estimativas baseadas em literatura técnica e o uso de bases de dados secundárias no *software* OpenLCA. Além disso, a exclusão de determinados fluxos ambientais, como emissões atmosféricas e efluentes tratados, restringe a abrangência da avaliação aos impactos associados predominantemente ao manejo do lodo.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do escopo da análise por meio da avaliação de cenários alternativos de destinação do lodo, bem como a integração da ACV com análises econômicas e sociais, de modo a fornecer uma visão mais abrangente da sustentabilidade dos sistemas de saneamento.

## 7. REGISTRO DAS PRODUÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

**Quadro 02** – Registro de produções bibliográficas

<b>Tipo</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico ou Evento</b>	<b>Status</b>	<b>Autores</b>	<b>Ano</b>
<b>Apresen- -tação de trabalho</b>	Análise Integrada de Resíduos do Saneamento Mediante Avaliação do Ciclo de Vida em São José do Rio Preto/SP	3º CoEUrb - Colóquio de Engenharia Urbana	Apresenta- do no Evento	Bárbara Garcia de Souza e Cali Laguna Achon	2025
<b>Artigo e Apresen- -tação em Evento</b>	Análise da Gestão e Cobrança pelo Serviço de Manejo de Resíduos Sólidos no Estado de São Paulo	ENANPUR – Ideias, políticas e práticas em territorialidades do Sul Global	Aceito e Apresen- tado no Evento	Bárbara Garcia de Souza, Luis Filipe Costa da Silva, Cali Laguna Achon, Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira, Elza Luli Miyasaka	2025
<b>Artigo 1 da Dissers- -tação</b>	Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de	Revista Científica Procesos Urbanos	Submetido à revista A1	Bárbara Garcia de Souza e	2025

Tipo	Título	Periódico ou Evento	Status	Autores	Ano
	Vida de Resíduos do Saneamento : Revisão Sistemática	ISSN: 2500-5200		Cali Laguna Achon	
<b>Artigo 2 da Dissertação</b>	Inventário de Ciclo de Vida da Estação de Tratamento de Água e Esgoto de São José do Rio Preto/SP	A definir	Em andamento	Bárbara Garcia de Souza e Cali Laguna Achon	2026
<b>Artigo 3 da Dissertação</b>	Avaliação de Impacto Ambiental da Estação de Tratamento de Água e Esgoto de São José do Rio Preto/SP	A definir	Em andamento	Bárbara Garcia de Souza e Cali Laguna Achon	2026

Fonte: Autora, 2025

## 8. REFERÊNCIAS

Achon, C. L. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISSO 14.001**. 2008. 235p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Achon, C. L.; Barroso, M. M.; Cordeiro, J. S. (2013). **Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro**. Eng Sanit Ambient, v.18 n.2, abr/jun 2013, 115-122.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília: ANA; Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2017.

Amaral, K. G. C. do; Aisse, M. M.; Posetti, G. R. C. (2020). **Análise do custo de ciclo de vida do tratamento e destinação final do lodo e biogás, provenientes de ETE que emprega reatores do tipo UASB**. Revista DAE | São Paulo | v. 68, n 226 / pp 06-17 | Out a Dez, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.064>

Amaral, K. G. C.; soares, J. S.; Rietow, J. C.; Aisse, M. M. **ACV ambiental de ETE que emprega lodos ativados como pós-tratamento de reator UASB**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n.3, p.312-322, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0026>

Andreoli, C. V. (2001). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Projeto PROSAB. ISBN: 85-86552-19-4.

Andreoli, C. V.; Lara, A. I. de; Ferreira, A. C.; Bonnet, B. R. P.; Pegorini, E.S. R G K I **A Gestão dos Biossólidos Gerados em Estações de Tratamento de Esgoto Doméstico** li. Engenharia e Construção, Curitiba, setembro/98, n. 24.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 38 p.

Babatunde, A. O.; Zhao, Y. Q. (2007). **Constructive Approaches Toward Water Treatment Works Sludge Management: An International Review of Beneficial Reuses**. <https://doi.org/10.1080/10643380600776239>

Bantacut, T.; Romli, M.; Agustiar; Nasution, A. (2025). **Gate-to-gate life cycle assessment of crude palm oil in palm mills in West Aceh-Indonesia**. Journal of Ecological Engineering. <https://doi.org/10.12911/22998993/196932>

Behjat, M.; Svanstrom, M.; Peters, G. (2024). **Environmental assessment of phosphorus recovery from dairy sludge: A comparative LCA study**. Waste Management 187 (2024) 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.06.011>

Bonton, A.; Bouchard, C.; Barbeau, B.; Jedrzejak, S. (2011). **Comparative life**  
Boratto, D. C.; Sperling, M. V. (2023). **Análise e comparação técnica e econômica de alternativas de processamento de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários para uso em solos**. Revista DAE | São Paulo | v. 71, n 240 / pp 06-22 | Abr a Jun, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.018>.

Brasil. 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, e 8.666, de 21 de junho de 1993; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 8 jan. 2007.

Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 3 ago. 2010.

Brasil. Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025. **Institui a Lei Geral do Licenciamento Ambiental, estabelece normas gerais para o licenciamento ambiental no território nacional e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 8 ago. 2025.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Dispõe sobre critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários em solos e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 20 ago. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10004:2020. **Resíduos sólidos — Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

Bueno, C. **Avaliação do Ciclo de Vida na Construção Civil: Análise de sensibilidade**. 2014. 268p. Tese (doutorado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

Chaouali, S.; Dos Muchangos, L. S.; Ito, L.; Tokai, A. (2024). **Assessment of the Environmental Impacts of Wastewater Treatment in Tunisia** Journal of Water and Environment Technology, Vol.22, n.2: 61-74, 2024. doi: 10.2965/jwet.22-119

Chen, Z.; Wang, D.; Sun, M.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Wu, G.; Jia, W.; Shi, L.; Wu, Q.; Guo, F.; Hu, H-Y. (2018). **Sustainability evaluation and implication of a large scale membrane bioreactor plant**. Bioresource Technology 269 (2018) 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.107>

Correa, S. R.; Machado, R. L. **Análise bibliométrica de publicações na temática do big data utilizando o VOSviewer**. Gestão, Inovação e Negócios,

Maringá, v. 4, n. 1, p. 1–12, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.37951/2358-9868.2018v4i1.p01-12>.

Guerra, R. C.; Angelis, D. F. D. **Classificação e biodegradação de lodo de estações de tratamento de água para descarte em aterro sanitário**. Arquivos do Instituto Biológico, São Paulo, v. 72, n. 1, p. 87–91, jan./mar. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/1808-1657v72p0872005>

Ender Çetin, E.; Yıldız, I. A. E.; Yaşar, C. O.; Yulistyorini, A. (2025). **Life Cycle Assessment of Medical Waste Management: Case Study for Istanbul**. Appl. Sci. 2025, 15, 4439. <https://doi.org/10.3390/app15084439>

Bonton, A.; Bouchard, C.; Barbeau, B.; Jedrzejak, S. (2012). **Comparative life cycle assessment of water treatment plants**. 2011. Desalination 284 (2012) 42–54. doi:10.1016/j.desal.2011.08.035

Da Silva, L. F. C.; De Souza, B. G., Miyasaka, E. L., De Melo, R. E. B., Medeiros S. B. (2024). **Vazios Urbanos não Edificados e os entraves na aplicação do PEUC: São José Do Rio Preto como estudo de caso**. 2ª CIDADES + RESILIENTES Transformações urbanas frente às questões humanas. São Carlos – Brasil 17 e 18 de setembro de 2024.

De Paula, M. F; Rodgher, S.; Fiore, F. A. (2023). **Caracterização e Avaliação dos Impactos Ambientais do Lodo de ETAs em Dois Estados Brasileiros**. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte – MG. 21 a 24 de maio de 2023.

Di Maria, F.; Sisani, F. (2017). **A life cycle assessment of conventional technologies for landfill leachate treatment**. Environmental Technology & Innovation 8 (2017) 411–422. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.09.002>

DIÁRIO DA REGIÃO. **Palácio das Águas**. Disponível em: <https://bemestar.diariodaregiao.com.br/undefined/palacio-das-aguas.1728167375126>.

Ding, H.; Wang, H.; Huang, G.; Zhu, Y.; Zhang, L.; Zhang, X.; Zhou, M.; Wang, Q.; Li, X.; Xu, Q.; Zhao, J.; Qian, G. (2024). **Assessing the wastewater reclaim system consisted of wastewater plant - hybrid constructed wetland - ultra filtration and reverse osmosis in a chemical industrial park, a multi-criteria decision-making analysis**. Science of the Total Environment 926 (2024) 171942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171942>

Silva, A. R. Da; Achon, C. L. (2021). **Gestão de riscos ocupacionais no manejo do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto**. Revista DAE, São Paulo, v. 69, n 230 / pp 29-47, Abr a Jun, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.031>

European Commission; Joint Research Centre; Institute for Environment and Sustainability. **ILCD handbook: analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment**. Background

document. First edition. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.

Edwards, J.; Othman, M.; Crossin, E.; Burn, S. (2017). **Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: A comparative life cycle assessment in the context of a waste service provision.** *Bioresource Technology* 223 (2017) 237–249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.044>

Eriksson, O.; Bisailon, M.; Haraldsson, M.; Sundberg, J. (2016). **Enhancement of biogas production from food waste and sewage sludge e Environmental and economic life cycle performance.** *Journal of Environmental Management* 175 (2016) 33e39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.022>

Fiore, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. (2020). **Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants.** *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* ISSN 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X.

Goel, S.; Kansal, A.; Pfister, S. (2021). **Sourcing phosphorus for agriculture: Life cycle assessment of three options for India.** *Resources, Conservation & Recycling* 174 (2021) 105750. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105750>

Gonçalves, R. F. (1999). **Gerenciamento do lodo de lagoas de estabilização não mecanizadas.** Programa de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB. Universidade Federal do Espírito Santo.

Harder, R.; Peters, G. M.; Svanström, M.; Khan, S. J.; Molander, S. (2017). **Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modelling choices.** *Int J Life Cycle Assess* (2017) 22:731–743. DOI 10.1007/s11367-016-1182-x

Hossain, M. U.; Wang, L.; Chen, L.; Tsang, D. C. W.; Ng, S. T. Poon, C. S.; Mechtcherine, V. (2020). **Evaluating the environmental impacts of stabilization and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: A case study of Hong Kong.** *Environment International* 145 (2020) 106139. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106139>

Huang, Y.; Zhen, Y.; Liu, L.; Ning, X.; Wang, C.; Li, K.; Zhao, L.; Lu, Q. (2023). **Comprehensive competitiveness assessment of four typical municipal sludge treatment routes in China based on environmental and technoeconomic analysis.** *Science of the Total Environment* 895 (2023) 165123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165123>

Karolinczak, B.; Walczak, J.; Bogacka, M.; Sudol, M. Z.; **Life Cycle Assessment of sewage sludge mono-digestion and co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste at a wastewater treatment plant.** *Science of the Total Environment* 907 (2024) 167801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167801>

Lee, E.; Oliveira, D. S. B. L.; Oliveira, L. S. B. L.; Jimenez, E.; Kim, Y.; Wang, M.; Ergas, S. J.; Zhang, Q. (2020). **Comparative environmental and economic life cycle assessment of high solids anaerobic co-digestion for biosolids and organic waste management.** *Water Research* 171 (2020) 115443. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115443>

Li, Y.; Lv, M.; Li, R.; Liu, Z. (2022). **Life cycle assessment of melting reduction treatment for iron and steel waste slag: A case study in Tangshan, China.** *Resources, Conservation & Recycling Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200108>

Liu, C.; Moon, D.; Watabe, A. **Assessing the Economic and Environmental Impacts of Anaerobic Digestion for Municipal Organic Waste: A Case Study of Minamisanriku Town, Japan.** *Sustainability* 2024, 16, 6793. <https://doi.org/10.3390/su16166793>

Liu, M.; Yuan, X.; Chen, L.; Sheng, X.; Wang, Q.; Ma, Q.; Zuo, J. (2025). **Parameter-sensitive life cycle assessment of sludge incineration technologies integrating energy balance model.** *Waste Management* 201 (2025) 114783. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114783>

Liu, Z.; Yin, D.; Ge, H.; Zhou, G.; Song, T. (2023). **Techno-economic analysis of municipal sludge co-combustion power generation with different fuels.** *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11 (2023) 111593. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111593>

Maalouf, A.; El-Fadel, M. (2018). **Carbon footprint of integrated waste management systems with implications of food waste diversion into the wastewater stream.** *Resources, Conservation & Recycling* 133 (2018) 263–277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.021>

Marami, H.; Tsapekos, P.; Khoshnevisan, B.; Madsen, J. A.; Andersen, J. K.; Rafiee, S.; Angelidaki, I. (2022). **Going beyond conventional wastewater treatment plants within circular bioeconomy concept – a sustainability assessment study.** *Water Science & Technology* Vol 85 No 6, 1878 doi: 10.2166/wst.2022.096

Mendes, N. C; Bueno, C.; Ometto, A. R. (2016). **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos.** *Production*, 26(1), 160-175, jan./mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>

Messa, G. N.; Jesus, A. M. D. de; Fiore, F. A. (2025). **Beneficial use of sludge from water treatment plants as a multiple resource: Potential and limitations.** *Resources, Conservation & Recycling Advances* 25 (2025) 200247. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200247>

Mishra, H.; Gaurav, G.; Khandelwal, C.; Sharan, G.; Dangayach & P. N. Rao (2021) **Environmental assessment of an Indian municipal wastewater**

**treatment plant in Rajasthan**, International Journal of Sustainable Engineering, 14:5, 953-962, DOI: 10.1080/19397038.2020.1862349

Miyan, N.; Omur, T.; Bilici, S.; Ozkan, H.; Kabay, N. (2024). **Characterization of washing aggregate sludge waste as a novel supplementary cementitious material: Experimental study and life cycle assessment**. Journal of Environmental Management 366 (2024) 121923. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121923>

Mohammadi, A.; Venkatesh, G.; Sandberg, M.; Eskandari, S.; Joseph, S.; Granström, K. (2020). **A Comprehensive Environmental Life Cycle Assessment of the Use of Hydrochar Pellets in Combined Heat and Power Plants**. Sustainability 2020, 12, 9026; doi:10.3390/su12219026

Moraes, Lena Lúcia de; Kafure, Ivette. **Bibliometria e ciência de dados: um exemplo de busca e análise de dados da Web of Science (WoS)**. Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação, Campinas, v. 18, p. e020016, 21 jun. 2020. doi:10.20396/rdbci.v19i0.8658521.

Morelli, B.; Cashman, S.; Ma, X. C.; Turgeon, J.; Arden, S.; Garland, J. (2020). **Environmental and cost benefits of co-digesting food waste at wastewater treatment facilities**. Water Science & Technology. doi: 10.2166/wst.2020.104

Morero, B.; Vicentin, R.; Campanella, E. A. (2017). **Assessment of biogas production in Argentina from co-digestion of sludge and municipal solid waste**. Waste Management 61 (2017) 195–205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.033>

Nguyen, T. K. L.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Nghiem, L. D.; Qian, G.; Liu, Q.; Lui, J.; Chen, Z.; Bui, X. T.; Mainali, B. (2021). **Assessing the environmental impacts and greenhouse gas emissions from the common municipal wastewater treatment systems**. Science of the Total Environment 801 (2021) 149676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149676>

Ouattara, A.; Azhaari, R.N.N.; Hu, A.H.; Kuo, C.-H.; Huang, H. **Comparative Life Cycle Assessment Study on Carbon Footprint of Water Treatment Plants: Case Study of Indonesia and Taiwan**. Sustainability 2024, 16, 8409. <https://doi.org/10.3390/su16198409>

Paz, L. P. S. **Modelo conceitual de seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento das comunidades de pequeno porte**. 2007. 398p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Paz, L. P. S.; Di Bernardo, L. 2007. **SELEÇÃO DE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM FUNÇÃO DO RISCO E EFICIÊNCIA DAS ETAS**. Volume 1, número 3, ano 2007 ISSN 0718-378X.

Pereira, S. W. (2004). **Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos. Aplicação de avaliação do ciclo de vida.** Tese de mestrado em Engenharia Ambiental Universidade Federal de Santa Catarina.

Pérez, L. E.; Pérez, A. E.; Pino-Cortés, E.; Vallejo, F.; Díaz-Robles, L. A. (2022). **An environmental assessment for municipal organic waste and sludge treated by hydrothermal carbonization.** Science of the Total Environment 828 (2022) 154474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154474>

PIEKARSKI, C. M. (2013) **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira mdf.** 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, PR.

Prado, L. O.; Souza, H. H. S.; Chiquito, G. M.; Paulo, P. L.; Boncz, M. A. (2020). **A comparison of different scenarios for on-site reuse of blackwater and kitchen waste using the life cycle assessment methodology.** Environmental Impact Assessment Review 82 (2020) 106362. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106362>

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO. **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto: 2024.** São José do Rio Preto: Secretaria de Planejamento Estratégico, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024. Produção, v. 23, n. 2, p. 436-447, abr./jun. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132012005000037>.

Reali, Marco Antonio Penalva (coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Rio de Janeiro: ABES, 1999. 240 p. II. (Projeto PROSAB).

Reis, R. F. dos (2017) **Sistema de remoção de água de lodo anaeróbio de reator UASB com duas fases: Desaguamento inicial em leito de drenagem seguido de biossecagem.** Tese de doutorado em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos.

Rufi-Salís, M.; Petit-Boix, A.; Leipold, S.; Villalba, G.; Rieradevall, J.; Moliné, E.; Gabarrell, X.; Carrera, J.; Suárez-Ojeda, M. E. (2022). **Increasing resource circularity in wastewater treatment: Environmental implications of technological upgrades.** Science of the Total Environment 838 (2022) 156422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156422>

Santos, Glicia Vieira dos; Quadros, Ruy. **Capacidades dinâmicas para a transformação digital: uma análise bibliométrica exploratória com VOSviewer.** Revista de Gestão e Secretariado, São Paulo, v. 15, n. 7, p. e3970, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i7.3970>

SÃO JOSÉ DO RIO PRETO. **Retrofit recupera prédio histórico da ETA Palácio das Águas.** Prefeitura Municipal de São José do Rio Preto, 2024. Disponível em: <https://www.riopreto.sp.gov.br/noticias/retrofit-recupera-predio-historico-da-eta-palacio-das-aguas>.

Silva, A. R.; Achon, C. L. (2021). **Gestão de riscos ocupacionais no manejo Souza, F. G. C. Ocorrência de sólidos e metais na água tratada e nos resíduos gerados em ETA convencional de ciclo completo com descargas diárias.** 2004. 143p. Tese (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Silva, F. X., Barbosa, E. P., Mendes, V. d. R., & Santos, A. L. F. dos. (2021). **Three Review Studies Types in Educational Research: Characterization and Analysis.** *SciELO Preprints*. <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.2897>

Zhou, X.; Yang, J.; Sha, A.; Zhuang, Z.; Bai, S.; Sun, H.; Zhao, H. (2024). **Enhancing environmental and economic benefits of constructed wetlands through plant recovery: A life cycle perspective.** *Science of the Total Environment* 951 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175784>

Tian, D.; Cong, M.; Xu, Z.; Xu, X.; Tian, X.; Cong, X.; Lu, S. (2024). **Carbon sequestration and environmental impacts in ternary blended cements using dyeing sludge and papermaking sludge.** *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. <https://doi.org/10.1186/s43065-024-00109-9>

Urban, R. C. **Metodologias para gerenciamento de Lodo de ETA e ETE.** 2016. 204p. Tese (doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas, 2016.

Urban, R. C.; Isaac, R. L.; Morita, D. M. (2019). **Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte.** *Revista DAE*, n. 219, vol. 67, outubro a dezembro de 2019. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.050>

Urban, R.C. y Isaac, R. de L. 2019. **Ferramenta Espacial para Gerenciamento ee Resíduos: Elaboração de uma Metodologia Qualitativa para Identificar Áreas de Destinação Final de Lodos de ETA E ETE.** *Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*. 12, 1 (abr. 2019), 52–64. DOI:<https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2019.12.1.61160>.

Wang, Q.; Fu, H.; Gao, W.; Cai, Y.; Zhang, P.; Zhang, G. (2024). **Life cycle assessment of n-caproic acid production via chain elongation from food waste: Comparison of shunting and staged technology.** *Environmental Research* 251 (2024) 118596. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118596>

Wang, S.; Sahoo, K.; Jena, U.; Dong, H.; Bergman, R.; Runge, T. (2021). **Life-cycle assessment of treating slaughterhouse waste using anaerobic digestion systems.** *Journal of Cleaner Production* 292 (2021) 126038. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126038>

Willers. C. D.; Rodrigues, L. B.; Silva, C. A. da. (2013). **Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais.**

Xiao, H.; Li, K.; Zhang, D.; Tang, Z.; Niu, X.; Yi, L.; Lin, Z.; Fu, M. (2022). **Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge**

**management alternatives based on incineration.** Journal of Environmental Management 321 (2022) 115848. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115848>

Zhang, J.; Fei, F.; Jiang, Z.; Vorada, K.; Leong, Z. H.; Wen, Z.; Zhang, H.; Han, S. (2025). **Is multi-source solid waste co-disposal practices in waste-to-energy plants sustainable? A comparative life cycle assessment.** Resources, Conservation & Recycling 215 (2025) 108069. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108069>

Zhao, K.; Wei, Q.; Bai, M.; Shen, M. **Study on the Environmental Impact and Benefits of Incorporating Humus Composites in Anaerobic Co-Digestion Treatment.** Toxics 2024, 12, 360. <https://doi.org/10.3390/toxics12050360>

Zhao, Y.; Chan, W. P.; Chin, V.; Boon, Y. Z.; Fu, X.; Gu, Y.; Oh, J.; Lisak, G. (2024). **Technical and environmental assessment of sludge-derived slag generated from high temperature slagging co-gasification process as a sustainable construction material.** Waste Management 190 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.09.021>

Zhou, H.; Wei, L.; Wang, D.; Zhang, W. (2022). **Environmental impacts and optimizing strategies of municipal sludge treatment and disposal routes in China based on life cycle analysis.** Environment International 166 (2022) 107378. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107378>

Zhou, X.; Yang, J.; Sha, A.; Zhuang, Z.; Bai, S.; Sun, H.; Zhao, X. (2024). **Enhancing environmental and economic benefits of constructed wetlands through plant recovery: A life cycle perspective.** Sci Total Environ. 2024 Nov 15:951:175784. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175784. Epub 2024 Aug 24

Huijbregts, Mark A. J.; Steinmann, Zoran J. N.; Elshout, Pieter M. F.; Stam, Gea; Verones, Francesca; Vieira, Marisa; Zijp, Michiel; Hollander, Anne; Van Zelm, Rosalie.(2017). **ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.** The International Journal of Life Cycle Assessment. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

## APÊNDICE 01

### Figura 48 - Formulário de requisição de dados para a ETA de São José do Rio Preto



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana  
home-page: [www.ppgeu.ufscar.br](http://www.ppgeu.ufscar.br)  
e-mail: [ppgeu@ufscar.br](mailto:ppgeu@ufscar.br)



São José do Rio Preto, 03 de julho de 2024

Ao Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SeMAE)

Eu, Bárbara Garcia de Souza, mestranda inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PPGEU) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), sob a orientação e coordenação da pesquisadora profa. Dra. Cali Laguna Achon, estou desenvolvendo a pesquisa de mestrado intitulada "**Avaliação Integrada dos resíduos do saneamento. Estudo de caso de São José do Rio Preto**" que tem por objetivo avaliar os resíduos do saneamento (ETA e ETE) de forma integrada em São José do Rio Preto/SP, visando a avaliação do ciclo de vida do produto (ACV) para utilização benéfica do resíduo.

Nesse sentido para que a pesquisa seja viabilizada, vimos solicitar informações quantitativas e qualitativas da **Estação de Tratamento de Água (ETA)** de São José do Rio Preto/SP, conforme apresentado a seguir:

- 1) Qual a forma de captação de água bruta?
- 2) Qual o sistema de tratamento de água?
- 3) Qual a capacidade de tratamento da ETA? Como é a distribuição da água tratada?
- 4) Quais os produtos químicos inseridos no tratamento?
- 5) Existe caracterização do resíduo de lodo gerado?
- 6) Qual a destinação do lodo? Existe projetos para reaproveitamento desse resíduo?
- 7) Existe equipamento mecânico? Qual o consumo de energia elétrica?

Qualquer dúvida estamos à disposição para esclarecimentos. Desde já, agradecemos a atenção,

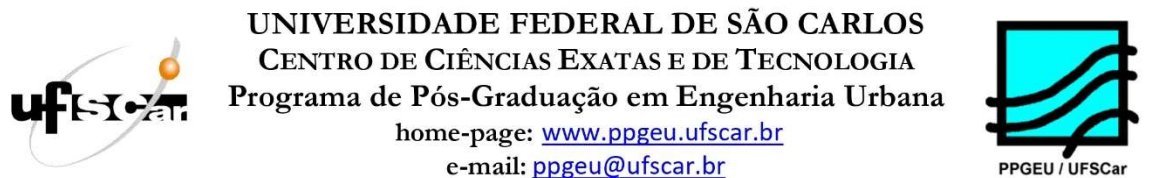
Profa. Dra. Cali Laguna Achon

Bárbara Garcia de Souza

Fonte: Autora, 2025

## APÊNDICE 02

**Figura 49** - Formulário de requisição de dados para a ETE de São José do Rio Preto



São José do Rio Preto, 03 de julho de 2024

Ao Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SeMAE)

Eu, Bárbara Garcia de Souza, mestranda inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana (PPGEU) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), sob a orientação e coordenação da pesquisadora profa. Dra. Cali Laguna Achon, estou desenvolvendo a pesquisa de mestrado intitulada **“Avaliação Integrada dos resíduos do saneamento. Estudo de caso de São José do Rio Preto”** que tem por objetivo avaliar os resíduos do saneamento (ETA e ETE) de forma integrada em São José do Rio Preto/SP, visando a avaliação do ciclo de vida do produto (ACV) para utilização benéfica do resíduo.

Nesse sentido para que a pesquisa seja viabilizada, vimos solicitar informações quantitativas e qualitativas da **Estação de Tratamento de Esgoto (ETE)** de São José do Rio Preto/SP, conforme apresentado a seguir:

- 1) Qual a tecnologia de tratamento do esgoto utilizada?
- 2) Existe análise das características do esgoto bruto até o efluente tratado?
- 3) Qual o tratamento realizado para o lodo gerado? Existe caracterização do lodo desaguado? Qual a destinação do lodo? Qual o volume destinado média/ano?
- 4) Em termos quantitativos, qual a vazão média? Qual a capacidade de tratamento da ETE?
- 5) Quais produtos químicos são utilizados no tratamento?
- 6) Existe equipamento mecânico? Qual o consumo de energia elétrica?
- 7) Qual o custo operacional da ETE?

Qualquer dúvida estamos à disposição para esclarecimentos. Desde já, agradecemos a atenção,

Profa. Dra. Cali Laguna Achon

Bárbara Garcia de Souza

Fonte: Autora, 2025

## APÊNDICE 03

**Quadro 02** – Relação de artigos extraídos da análise bibliométrica para revisão sistemática.

ID	TÍTULO	REVISTA	ANO	MÉTODO	DADOS	SOFTWARE
01	Parameter-sensitive life cycle assessment of sludge incineration technologies integrating energy balance model	Waste Management 201 (2025) 114783	2025	ReCiPe 2016	Dados <i>in loco</i> , literatura e Ecoinvent	SimaPro
02	Is multi-source solid waste co-disposal practices in waste-to-energy plants sustainable? A comparative life cycle assessment	Resources, Conservation & Recycling 215 (2025) 108069	2025	ReCiPe 2016	Ecoinvent	Easetech (v3.4.4)
03	Life Cycle Assessment of Medical Waste Management: Case Study for Istanbul	Applied Sciences	2025	CML 2001	Banco de dados GaBi e literatura	GaBi Education (versão 7.3)
04	Gate-to-gate life cycle assessment of crude palm oil in palm mills in West Aceh-Indonesia	Journal of Ecological Engineering	2025	IMPACT 2002+, ReCiPe 2016, Eco-Indicator 99 e CML	Literatura	Simapro Verssão 9 Pre Consultant
05	Technical and environmental assessment of sludge-derived slag generated from high temperature slagging co-gasification process as a sustainable construction material	Waste Management 190 (2024) 186–196	2024	CML 2001	Ecoinvent 3.5	GaBi
06	Carbon sequestration and environmental impacts in ternary blended cements using dyeing sludge and papermaking sludge	Journal of Infrastructure Preservation and Resilience	2024	Não mencionado (autor relata somente aplicação da ACV na pesquisa)	Banco de dados GaBi e literatura	GaBi
07	Enhancing environmental and economic benefits	Science of the Total Environment	2024	ReCiPe <i>Midpoint</i>	Literatura	OpenLCA

ID	TÍTULO	REVISTA	ANO	MÉTODO	DADOS	SOFTWARE
	of constructed wetlands through plant recovery: A life cycle perspective	951 (2024) 175784				
08	Comparative Life Cycle Assessment Study on Carbon Footprint of Water Treatment Plants: Case Study of Indonesia and Taiwan	Sustainability	2024	IPCC 2013 GWP 100a (v 1.03) e ReCiPe 2016 <i>midpoint endpoint</i> (v 1.03)	Literatura	Simapro 9.0.0.33
09	Environmental assessment of phosphorus recovery from dairy sludge: A comparative LCA study	Waste Management 187 (2024) 50–60	2024	CML 2016	Dados <i>in loco</i> e literatura	GaBi
10	Assessing the Economic and Environmental Impacts of Anaerobic Digestion for Municipal Organic Waste: A Case Study of Minamisanriku Town, Japan	Sustainability	2024	LIME 2	Dados <i>in loco</i> / entrevistas	Não mencionado pelo autor da pesquisa
11	Characterization of washing aggregate sludge waste as a novel supplementary cementitious material: Experimental study and life cycle assessment	Journal of Environmental Management 366 (2024) 121923	2024	ReCiPe 2016 v1.03	Ecoinvent 3.9	OpenLCA versão 2.0.4
12	Life cycle assessment of <i>n</i> -caproic acid production via chain elongation from food waste: Comparison of shunting and staged technology	Environmental Research 251 (2024) 118596	2024	CML 2000	European Life Cycle Database (ELCD)	OpenLCA
13	Assessing the wastewater reclaim system consisted of wastewater plant - hybrid constructed wetland - ultra	Science of the Total Environment 926 (2024) 171942	2024	CML 2001	Ecoinvent	GaBi 10.0.1.92

ID	TÍTULO	REVISTA	ANO	MÉTODO	DADOS	SOFTWARE
	filtration and reverse osmosis in a chemical industrial park, a multi-criteria decision-making analysis					
14	Study on the Environmental Impact and Benefits of Incorporating Humus Composites in Anaerobic Co-Digestion Treatment	Toxics	2024	Indicadores e categorias de impacto específicas	Dados de laboratório e busca na literatura	Não mencionado pelo autor da pesquisa
15	Life Cycle Assessment of sewage sludge mono-digestion and co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste at a wastewater treatment plant	Science of the Total Environment 907 (2024) 167801	2024	CML-IA 2013 + Recipe de 2016 + GWP100 do IPCC 2021	Ecoinvent 3.8	SimaPro 9.4.2.0
16	Assessment of the Environmental Impacts of Wastewater Treatment in Tunisia	Journal of Water and Environment Technology, Vol.22, N.2: 61–74, 2024	2024	ReCiPe <i>Midpoint e Endpoint</i> 2016	Eco-invent 3	SimaPro 9.1.1.1
17	Techno-economic analysis of municipal sludge co-combustion power generation with different fuels	Journal of Environmental Chemical Engineering 11 (2023) 111593	2023	Não mencionado (autor relata somente aplicação da ACV na pesquisa)	Literatura	Não mencionado pelo autor da pesquisa
18	Comprehensive competitiveness assessment of four typical municipal sludge treatment routes in China based on environmental and technoeconomic analysis	Science of the Total Environment 895 (2023) 165123	2023	CML-IA	Ecoinvent 3.0.1	SimaPro (versão 8.0.2)
19	Environmental, energy, and economic impact assessment of sludge management	Journal of Environmental Management 321 (2022) 115848	2022	CML 2001	Ecoinvent, versão 3.3 + Dados da literatura	GaBi

ID	TÍTULO	REVISTA	ANO	MÉTODO	DADOS	SOFTWARE
	alternatives based on incineration					
20	Life cycle assessment of melting reduction treatment for iron and steel waste slag: A case study in Tangshan, China	Resources, Conservation & Recycling Advances	2023	CML2001	Ecoinvent	Efootprint LCA
21	Increasing resource circularity in wastewater treatment: Environmental implications of technological upgrades	Science of the Total Environment 838 (2022) 156422	2022	ReCiPe	Dados primários	SimaPro 9
22	Environmental impacts and optimizing strategies of municipal sludge treatment and disposal routes in China based on life cycle analysis	Environment International 166 (2022) 107378	2022	CML-IA v3.06	Literatura + Ecoinvent 3.5	SimaPro (versão 9.1)
23	An environmental assessment for municipal organic waste and sludge treated by hydrothermal carbonization	Science of the Total Environment 828 (2022) 154474	2022	ReCiPe	Dados de laboratório + literatura + Ecoinvent 3	SimaPro versão 9.1.9.11
24	Going beyond conventional wastewater treatment plants within circular bioeconomy concept – a sustainability assessment study	Water Science & Technology Vol 85 No 6	2022	ReCiPe 2016 v1.1	Ecoinvent (versão V3.4) + Literatura	Não mencionado pelo autor da pesquisa
25	Assessing the environmental impacts and greenhouse gas emissions from the common municipal wastewater treatment systems	Science of the Total Environment 801 (2021) 149676	2021	ReCiPe 2016 + GHG Protocol	Ecoinvent 3.5 + Literatura	SimaPro 9.1
26	Sourcing phosphorus for agriculture: Life cycle assessment of three options for India	Resources, Conservation & Recycling 174 (2021) 105750	2021	ReCiPe 2016 + CED	Dados in loco + Literatura + Ecoinvent	SAS (Statistical Analysis System) University Edition

ID	TÍTULO	REVISTA	ANO	MÉTODO	DADOS	SOFTWARE
27	Life-cycle assessment of treating slaughterhouse waste using anaerobic digestion systems	Journal of Cleaner Production 292 (2021) 126038	2021	Não mencionado pelo autor da pesquisa	Literatura	Não mencionado pelo autor da pesquisa
28	Environmental assessment of an Indian municipal wastewater treatment plant in Rajasthan	International Journal of Sustainable Engineering	2020	CML 2001	Dados in loco	GaBi
29	Evaluating the environmental impacts of stabilization and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: A case study of Hong Kong	Environment International 145 (2020) 106139	2020	IMPACT 2002 +	Literatura + Ecoinvent	SimaPro 9.1.5
30	A Comprehensive Environmental Life Cycle Assessment of the Use of Hydrochar Pellets in Combined Heat and Power Plants	Sustainability	2020	IMPACT 2002 +	Ecoinvent 3.1 + ELCD + Literatura	SimaPro 8.0.4
31	Environmental and cost benefits of co-digesting food waste at wastewater treatment facilities	Water Science & Technology	2020	Não mencionado pelo autor da pesquisa	Dados in loco	openLCA versão 1.7.4
32	A comparison of different scenarios for on-site reuse of blackwater and kitchen waste using the life cycle assessment methodology	Environmental Impact Assessment Review 82 (2020) 106362	2020	Recipe H (midpoint)	SimaPro 9 + Ecoinvent v.3.5	Microsoft Excel
33	Comparative environmental and economic life cycle assessment of high solids anaerobic co-digestion for biosolids and organic waste management	Water Research 171 (2020) 115443	2020	TRACI 2.1 v1.0	Dados in loco + Literatura	SimaPro PhD (versão 8.0) +

ID	TÍTULO	REVISTA	ANO	MÉTODO	DADOS	SOFTWARE
34	Sustainability evaluation and implication of a large scale membrane bioreactor plant	Bioresource Technology 269 (2018) 246–254	2018	CML2001	Dados in loco + Literatura	GaBi
35	Carbon footprint of integrated waste management systems with implications of food waste diversion into the wastewater stream	Resources, Conservation & Recycling 133 (2018) 263–277	2018	Método desenvolvido pelos autores da pesquisa	Literatura	Não mencionado pelo autor da pesquisa
36	A life cycle assessment of conventional technologies for landfill leachate treatment	Environmental Technology & Innovation 8 (2017) 411–422	2017	ILCD 2011+	Ecoinvent 3.0 + Dados in loco	SimaPro 8.2
37	Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modelling choices	Int J Life Cycle Assess (2017) 22:731–743	2017	USEtox 1.01 e 2.0 + SLAtox	Dados in loco + Literatura	Microsoft Excel 2011
38	Assessment of biogas production in Argentina from co-digestion of sludge and municipal solid waste	Waste Management 61 (2017) 195–205	2017	ReCiPe	Ecoinvent v 3	SimaPro 8
39	Anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludge: A comparative life cycle assessment in the context of a waste service provision	Bioresource Technology 223 (2017) 237–249	2017	CML-IA (versão 4.2)	Dados in loco + Literatura + Ecoinvent	SimaPro 8.0
40	Enhancement of biogas production from food waste and sewage sludge e Environmental and economic life cycle performance	Journal of Environmental Management 175 (2016) 33e39	2016	CML 2001	Literatura	Não mencionado pelo autor da pesquisa

Fonte: Quadro elaborado pela autora, com dados extraídos dos artigos selecionados pela base de dados *Scopus*, 2025.