



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Programa Interunidades

unesp 

Doutorado

---

# Engenharia Civil e Ambiental

**ROSSANA BORGES TEIXEIRA**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA REGIONALIZADA DOS  
SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Bauru  
2022



**ROSSANA BORGES TEIXEIRA**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA  
REGIONALIZADA DOS SISTEMAS DE  
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo H. Ribeiro da Silva

Coorientadora: Dra. Laure Patouillard

BAURU

2022

Teixeira, Rossana Borges.

Avaliação do ciclo de vida regionalizada dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário/  
Rossana Borges Teixeira, 2022

120 f. : il.

Orientador: Gustavo H. Ribeiro da Silva

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2022

1. Regionalização. 2. Impacto ambiental. 3. Inventário do Ciclo de Vida. 4. ETE. 5. Tratamento de menor complexidade. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ROSSANA BORGES TEIXEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 04 dias do mês de março do ano de 2022, às 08:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de ROSSANA BORGES TEIXEIRA, intitulada **Avaliação do Ciclo de Vida regionalizada dos Sistemas de tratamento de esgoto sanitários**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. LUIZ ANTONIO DANIEL (Participação Virtual) do(a) Departamento de Hidráulica e Saneamento / Escola de Engenharia - USP - São Carlos, Prof. Dr. SEBASTIÃO ROBERTO SOARES (Participação Virtual) do(a) Engenharia Sanitária e Ambiental / Universidade Federal de Santa Catarina, Prof. Dr. BRENO BARROS TELLES DO CARMO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal do Ceará, Profa. Dra. THAÍS ANDRADE DE SAMPAIO LOPES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Meio Ambiente / Instituto Federal Baiano (IF Baiano). Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovada . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Gustavo  
Henrique  
Ribeiro da Silva

Assinado de forma digital por  
Gustavo Henrique Ribeiro da Silva  
DN: cn=Gustavo Henrique Ribeiro da  
Silva, o, ou,  
email=gustavo.ribeiro@unesp.br,  
c=BR  
Dados: 2022.03.08 15:48:53 -03'00'



Prof. Dr. GUSTAVO HENRIQUE RIBEIRO DA SILVA

Dedicatória

Aos que não viveram para ver esse dia,

Aline, Pai, Tio Antônio, ...

Sei que estariam na primeira fila, nem  
que fosse em pensamento.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu companheiro Gustavo que me apoiou ao longo dessa jornada, inclusive no desvio tomado pelo Canadá, sempre dizendo “tenta lá”.

Agradeço a outro Gustavo, neste caso meu orientador Prof. Gustavo H. Ribeiro da Silva, pelo direcionamento dado ao longo de todo o processo, inclusive encontrando um contato distante no Canadá que agiu na hora exata. Agradeço ao Prof. Ricardo Gabbay de Souza, pelo ponta pé inicial dessa pesquisa, quando eu ainda era uma candidata na seleção de doutorado. E a Laure Patouillard pela substituição na coorientação de última hora, mas finalizando o que ela e o Prof. Manuele, o qual também sou grato, tinham começado em 2019.

Aos colegas do CIRAIG, agradeço em especial ao Alejandro Padilla-Rivera que lançou as sementes tanto da pesquisa quanto do doutorado sanduíche. E ao Ivan Viveros, gratidão pelas ajudas técnicas, mas principalmente pela amizade, que espero ser eterna.

Aos estudantes da Iniciação Científica, Leonardo e Jeniffer, pelo suporte no mundo da construção.

Não posso deixar de agradecer as colegas Marcela Murakami, Fabiana Munhoz e Rízia, em nomes dos outros colegas da pós. Pelo contato humano e as portas abertas, agradeço ao professor Mateus.

Não posso deixar de agradecer as minhas Amigas Mirela e Érica pela orientação informal e revisões de uma mensagem à um projeto. Aos outros amigos, agradeço também, porque se não me ajudaram é porque não identifiquei algo a pedir, porque sei que posso contar com todos.

Assim como agradeço aos meus primos Omar, Alex e Márcio, que tiveram a oportunidade de contribuir nessa pesquisa. Da mesma maneira, sei

que os outros familiares estariam prontos a me ajudar, se tivessem sido solicitados.

Em especial, agradeço pela torcida familiar, liderados pelos meus pais, Amilton e Maria Alice, pela minha irmã Vanessa e minha prima Larissa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*It's times like these you learn to live again*  
*It's times like these you give and give again*  
*It's times like these you learn to love again*  
*It's times like these time and time again*

**Foo Fighters**

## RESUMO

A falta de tipos de tratamentos biológicos não é o motivo para o baixo índice de tratamento de esgoto no Brasil. O clima quente torna esses tratamentos mais eficientes em remoção de matéria orgânica, requerendo menores volumes. 3 tipologias dominam no Brasil: Lagoas de Estabilização (LE), Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (Reator UASB) e Lodos Ativado (LA). A LA, apesar de apresentar melhor eficiência de remoção de poluentes, demanda eletricidade e gera mais lodo. As outras duas tipologias, de baixa complexidade, não demandam eletricidade e materiais para as remoções, porém a LE demanda grandes áreas para construção. O Reator UASB, que é compacto e produz biogás, demanda um tratamento complementar. Assim, a hipótese é que as tipologias LE e Reator UASB sejam mais sustentáveis para o Brasil e outras regiões de clima quente. Entretanto, a sustentabilidade destas não são tão avaliadas quanto a LA. Para comparar os impactos ambientais destas 3 tipologias, aplicou-se a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) englobando os estágios de construção, operação, destinação de lodo e lançamento do esgoto tratado. Para obter resultados mais acurados, a Regionalização da ACV foi aplicada com o uso de dados primários e secundários brasileiros para o inventário, parâmetros de clima quente para o dimensionamento dos tratamentos, matriz elétrica brasileira e a versão para a América Latina do método *Impact World+*. A tipologia LA foi avaliada separadamente e em complemento ao Reator UASB (UASB+LA). A tipologia UASB+LA apresentou menos danos ambientais para as 2 áreas de proteção (AP), Saúde humana (SH) e Qualidade dos ecossistemas (QE) e a LA mais danos, ainda que usando métodos não regionalizados. A maior contribuição é devido aos metais no esgoto tratado e no lodo gerado, respectivamente, nas categorias Ecotoxicidade de Água Doce e Toxicidade Humana Não Cancerígena, ambas de Longo Termo. A construção, mesmo da tipologia mais tecnológica, LA, tem impactos significativos. Utilizar o lodo como biofertilizante aumenta os danos à saúde humana ao alterar o uso do solo de geral para agrícola. As tipologias dependentes de eletricidade, LA e UASB+LA, são mais sensíveis as: 1- alterações na matriz elétrica, com elevação dos danos devido a maior participação de fontes não renováveis (comprovando a importância da Regionalização), e 2- as quantidades consumidas de eletricidade na fase de operação. Porém não é suficiente para alterar a ordem de danos:  $LA > LE > UASB+LA$ , assim como no uso dos métodos globais *IW+* e *ReCiPe 2016*. Apesar dos danos ambientais, todas as tipologias reduzem em aproximadamente 100% estes em comparação ao lançamento do

esgoto sem tratamento para a QE, porém aumentam os danos para a AP SH. O método *ReCiPe 2016* indica que a tipologia UASB+LA reduz os danos em comparação ao lançamento de esgoto sem tratamento, exceto para a AP Escassez de recursos. A tipologia UASB+LA é a menos danosas de acordo com a ACV Regionalizada num cenário Brasileiro. Recomenda-se esta tipologia, de simples operação e baixos custo, para a ampliação do tratamento de esgoto em regiões de clima quente.

Palavras-chave: Regionalização, Impacto ambiental, Inventário do Ciclo de Vida, ETE, Tratamento de menor complexidade.

## ABSTRACT

The lack of biological wastewater treatment types is not the reason for the low index of safely treated sewage in Brazil. The warm climate turns those treatments more efficient in organic matter removal, demanding smaller volumes. Three typologies corner this market: Stabilization Ponds (SP), Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), and Activated Sludge (AS). AS, although presents better pollutants removal, requires electricity, and generates more sludge. The other two, low complexity ones, do not require electricity and materials to removal, however, SP requires a large land surface. UASB, which is compact and produces biogas, demands a complementary treatment. Thus, the hypothesis is that the typologies SP and UASB are more sustainable for Brazil and other warm climate regions. Although, their sustainability is not frequently assessed as AS. To compare the environmental impacts of these three typologies, Life Cycle Assessment (LCA) was applied to construction, operation, sludge destination, and effluent discharge stages. To get more accurate results, LCA Regionalization was applied, Brazilian foreground and background data to inventory, warm climates parameters to construction sizing, Brazilian electricity matrix, and Latin American version of Impact World+ were used. AS typology was assessed lonely and as a supplement to UASB (UASB+AS). UASB+AS presented less environmental damage for the two Areas of protection (AOP), Human Health (HH) and Ecosystem Quality (EQ), and LA presented more damage, although using no regionalized methods. The great contribution is due to metals on effluent and sludge generated, respectively, in the categories Freshwater Ecotoxicity and Non-Cancer Human Toxicity, both in long term. Construction, though the more technological, AS, has significant impacts. Reusing sludge as a biofertilizer increases damage to human health because it changes soil uses from general to farm soil. The more power-dependent typologies, AS and UASB+AS, are more sensitive to 1- electrical matrix changes, damages variability related to matrix fossil fuel participation (as proof of Regionalization importance), and 2- power consumption during the operation stage. Although keeping the same damage order among systems:  $AS > SP > UASB+AS$ , in the same way when using non-regionalized methods Default IW+ and ReCiPe 2016. Despite the damage to the environment from domestic sewage treatments, all WWTPs assessed reduced by approximately 100% the damage caused by the release of untreated domestic sewage into water bodies for the AOP EQ, while these treatments increased damages to AOP HH. ReCiPe 2016 shows that UASB+AS reduces damages in comparison to the

release of untreated sewage, except for AOP Resource Scarcity. UASB+LA is the less damage typology in accordance with this Regionalized LCA in a Brazilian scenario. This typology, of simple operation and small costs, is recommended to increase sewage treatment in warm climate regions.

Keywords: Regionalization, environmental impact, Life Cycle Inventory, STP, Low complexity treatment,

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Fases da ACV e suas interrelações. ....	12
<b>Figura 2</b> – Regiões e Países com números de métodos disponíveis (principais) para quantificação dos impactos.....	19
<b>Figura 3</b> – Exemplo de diferença de magnitude no FC de acordo com a região considerada. ....	19
<b>Figura 4</b> – Comparação dos resultados de ACV regionalizada de ETEs em diferentes países da América Latina e Caribe para dois tipos de tratamentos: Lodos Ativados com aeração prolongada (EA) e Lagoas de Estabilização (PS). ....	21
<b>Figura 5</b> - Número de artigos encontrados na base de dados Scopus.....	23
<b>Figura 6</b> – Principais revistas utilizadas para a divulgação dos resultados de ACVs em ETEs. ....	23
<b>Figura 7</b> – 20 Países líderes em publicações sobre aplicação de ACV em ETEs. ....	24
<b>Figura 8</b> – Nomes e números de publicação dos principais autores sobre ACV em ETEs. ....	25
<b>Figura 9</b> - Número de artigos que consideram cada um dos 3 estágios do ciclo de vida dos sistemas de tratamento de esgoto sanitários.....	30
<b>Figura 10</b> - Processos principais de uma ETE.....	31
<b>Figura 11</b> - Métodos de Caracterização de impactos utilizados. ....	36
<b>Figura 12</b> - Categorias de impacto mais quantificadas e número de vezes em que foram adotadas. ....	37
<b>Figura 13</b> - Sistemas de tratamento de esgoto sanitários mais adotados no Brasil de acordo com revisão bibliográfica. ....	39
<b>Figura 14</b> - Número de municípios que tratam menos de 10 % do esgoto por faixas de população.....	42
<b>Figura 15</b> – Fronteiras dos sistemas aplicáveis as 3 estações de tratamento de esgoto. ....	47
<b>Figura 16</b> - Sistemas de tratamento de esgoto sanitário por Lagoas de Estabilização, Reator UASB e Lodos Ativados em operação no Brasil levantados pelos pesquisadores da UNAM. ....	49

- Figura 17** - Representação das principais entradas e saídas do inventário e dos subprocessos relevantes para os sistemas avaliados..... 62
- Figura 18** - Contribuições por estágios do ciclo de vida da avaliação de dados realizada para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA). ..... 67
- Figura 19** - Resultados da AICV dos 3 sistemas de tratamento de esgoto. Impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (à direita). As contribuições de suas respectivas categorias de impacto também são exibidas..... 78
- Figura 20** - Resultados da AICV dos 3 sistemas de tratamento de esgoto por estágio do ciclo de vida: Construção, Operação, Destinação de lodo (Dest. Lodo) e Lançamento do esgoto tratado (Lançamento). Impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: Saúde humana em DALY (esquerda) e qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (à direita)..... 80
- Figura 21**- Contribuição dos principais materiais de construção para os impactos da construção dos 3 sistemas. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior)..... 83
- Figura 22** – Contribuição dos materiais de construção para as categorias de impacto intermediárias da etapa de construção para o Sistema Lodos Ativados. .... 84
- Figura 23** – Contribuição dos materiais de construção para as categorias de impacto intermediárias da etapa de construção para o Sistema Reator UASB + Lodos Ativados ..... 85
- Figura 24** – Contribuição dos materiais de construção para as categorias de impacto intermediárias da etapa de construção para o Sistema Lagoas de Estabilização..... 86
- Figura 25** – Impactos ambientais por estágio do tratamento de esgoto sanitário: Pré-tratamento, Tratamento secundário (Secundário), Remoção/Inativação de agentes patogênicos (R/I de patógenos e Leito de Secagem. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde

humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita). ..... 87

**Figura 26** - Comparação da performance ambiental de 2 formas de remoção/inativação de agentes patogênicos, incluindo as etapas de construção e a operação. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita). ..... 88

**Figura 27** - Comparação da performance ambiental das 3 ETEs com o lançamento de esgoto sem tratamento. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year em escala logarítmica (direita). ..... 90

**Figura 28** - Comparação da performance ambiental de 2 formas de destinação do lodo: Aterro sanitário (Aterro) e uso como biofertilizante (BF) para os 3 STEs. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior). ..... 93

**Figura 29** - Comparação da performance ambiental ao utilizar outro provedor de energia elétrica: brasileira (BR) e global (RoW)), para os 3 sistemas. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior). ..... 98

**Figura 30** - Comparação das contribuições das categorias de impacto para a obtenção de energia elétrica de acordo com o provedor: Brasil ou Global. As contribuições são apresentadas para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior). ..... 99

**Figura 31** - Variações nos impactos do ciclo de vida (barras de erro) em consequência das variações nos consumos de energia elétrica nos 3 sistemas na fase operação. As contribuições são apresentadas para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita). ..... 101

**Figura 32** – Comparação entre os impactos ambientais calculados com o mesmo método, IW+, um com FC Globais (Glo) e outro com FC para a América Latina (AL) para as 3 ETEs em estudo. As contribuições são apresentadas para as 2 áreas de proteção: a- Saúde

humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita). ..... 102

**Figura 33** - Danos à saúde humana das 3 ETEs em comparação ao lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Valores, em DALY, obtidos com o uso do ReCiPe 2016 como método de caracterização. a- Categorias de maior contribuição, e b- Categorias de maior contribuição sem a categoria dominante para melhor visualização. .... 105

**Figura 34** - Danos aos ecossistemas das 3 ETEs em comparação ao lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Valores, em espécies.ano, obtidos com o uso do ReCiPe 2016 como método de caracterização. a- Categorias de maior contribuição, e b- Categorias de maior contribuição sem a categoria dominante para melhor visualização. .... 106

**Figura 35** – Impacto sob a escassez de recursos das 3 ETEs em comparação ao lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Valores em dólares, obtidos com o uso do ReCiPe 2016 como método de caracterização. a- Escassez de recursos minerais e Escassez de recursos fósseis e b- Categorias de menor contribuição para melhor visualização. .... 106

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - 30 artigos mais citados de ACV em ETEs de acordo com a análise bibliométrica realizada .....	27
<b>Tabela 2</b> - Funções dos processos avaliados, Unidades Funcionais e identificação dos artigos em que foram utilizadas.....	32
<b>Tabela 3</b> – Processos considerados na ACV e identificação dos artigos em que foram adotados.....	34
<b>Tabela 4</b> - Sistemas de tratamento específicos e quantidade de amostras.....	50
<b>Tabela 5</b> – Emissões atmosféricas inventariadas por tipo de tratamento .....	54
<b>Tabela 6</b> – Geração de lodo por sistema de tratamento e conteúdo de sólidos adotado com fonte destes dados.....	55
<b>Tabela 7</b> - Composição do fertilizante a ser substituído pelo lodo para cálculo da relação de quantidade a ser substituída.....	56
<b>Tabela 8</b> - Composição do lixiviado produzido pelo aterramento de lodo após tratamento em lagoas.....	56
<b>Tabela 9</b> - Composição do biogás produzido pelo aterramento de lodo.....	56
<b>Tabela 10</b> - Parâmetros usados no dimensionamento dos 3 tipos de ETEs.....	58
<b>Tabela 11</b> – Fatores para conversão de matérias e serviços em materiais disponíveis no Ecoinvent <sup>®</sup> .....	61
<b>Tabela 12</b> - Contribuições e variabilidades das entradas do inventário na análise de dados.....	66
<b>Tabela 13</b> – Consumos e emissões diretas por unidade funcional (m <sup>3</sup> ) da etapa de operação das 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).....	68
<b>Tabela 14</b> – Consumos e emissões da destinação dos lodos dos 3 sistemas em aterro: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).....	69

<b>Tabela 15</b> - Consumos e emissões da alternativa de disposição do lodo como fertilizantes para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA). .....	70
<b>Tabela 16</b> – Concentrações dos poluentes do esgoto sanitário e poluentes remanescentes para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA). .....	71
<b>Tabela 17</b> - Volumes e áreas dos principais reatores (tanques e lagoas) para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB+ Lodos Ativados e Lodos Ativados (LA). .....	72
<b>Tabela 18</b> - Materiais consumidos na fase de construção, abertos por estágios de tratamento das 3 ETEs : Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA). Todos os resultados são apresentados por 1m <sup>3</sup> de esgoto.....	73
<b>Tabela 19</b> – Resumo dos inventários de ETEs comparados aos do presente trabalho ..	75
<b>Tabela 20</b> – Impactos ambientais das 3 ETEs em comparação aos impactos do lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Os valores são abertos em categorias para cada uma das áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior). .....	91
<b>Tabela 21</b> - Fatores de impacto adotados pelo método Impact World+ de acordo com o uso do solo (agricultura ou geral) para os metais de maiores contribuição para a área de proteção saúde humana (mercúrio e chumbo) em comparação aos fatores de impacto para a Ecotoxicidade de Água Doce e para o arsênio. ....	94
<b>Tabela 22</b> – Consumos mínimos, médios (base) e máximos de energia elétrica na fase de Operação dos 3 ETEs em kWh por metro cúbico de esgoto tratado. ....	101
<b>Tabela 23</b> – Valores dos Fatores de caracterização estimados pelo método AWARE para diferentes regiões e para diferentes usos da água. ....	103

## ÍNDICE DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Detalhes dos estágios constituintes de cada tratamento a ser estudado.....	41
<b>Quadro 2</b> - Definição dos Elementos de Objetivo e Escopo a serem adotados na realização da ACV.....	44
<b>Quadro 3</b> – Fontes dos dados utilizados no estudo de Contribuição X Variabilidade..	52

## ABREVIATURAS

AP	Áreas de proteção
DAG	Decagrama
DALY	Anos de incapacidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio (5 dias a uma temperatura de 20 °C)
DQO	Demanda química de oxigênio
FC	Fator de caracterização
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GTP100	Temperatura global potencial num horizonte de 100 anos
GWP100	Potencial de aquecimento global num horizonte de 100 anos
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LA	Lodos Ativados
LE	Lagoas de Estabilização
PEAD	Polietileno de alta densidade
PDF.m2.yr	Potencial de desaparecimento de fração de espécies por área e ano
UASB + LA	Reator UASB seguido de Lodos Ativados
SNIS	Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento
UASB	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo

## SUMÁRIO

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE TABELAS .....	ix
ÍNDICE DE QUADROS .....	xi
ABREVIATURAS .....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivo Específicos .....	4
3. HIPÓTESE E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA .....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
4.1. ETes no Brasil .....	7
4.1.1. Lagoas de Estabilização .....	8
4.1.2. Lodos Ativados .....	9
4.1.3. Reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (Reator UASB) .....	10
4.2. Avaliação do Ciclo de Vida .....	11
4.3. Regionalização.....	18
4.4. Avaliações do Ciclo de Vida e o tratamento de esgoto sanitário.....	22
5. MATERIAL E MÉTODO .....	38
5.1. Definição de objetivo e escopo da ACV.....	38
5.1.1. Definição das ETes avaliadas .....	38
5.1.1.1. Lagoas de Estabilização.....	39
5.1.1.2. Reator UASB seguido de Lodos Ativados .....	40

5.1.1.3.	Lodos Ativados.....	40
5.1.2.	Determinação da população a ser atendida pelas ETEs .....	41
5.1.3.	Objetivo e o Escopo da Avaliação da ACV .....	43
5.2.	Inventário do Ciclo de Vida.....	48
5.2.1.	Estudo de contribuição ao impacto e variabilidade dos dados.....	50
5.2.2.	Demais entradas e saídas do Inventário .....	54
5.2.2.1.	Emissões atmosféricas do tratamento de esgoto sanitário.....	54
5.2.2.2.	Metais .....	54
5.2.2.3.	Emissões e consumos da destinação de lodo em aterro sanitário e reuso como biofertilizante.....	55
5.2.2.4.	Inventário de construção das ETEs .....	57
5.3.	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	63
5.4.	Interpretação .....	63
5.4.1.	Análises de Sensibilidade.....	63
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	65
6.1.	Inventário do Ciclo de Vida.....	65
6.1.1.	Estudo de contribuição ao impacto e variabilidade dos dados.....	65
6.1.2.	Inventários obtidos .....	67
6.1.2.1.	Inventário de Operação.....	67
6.1.2.2.	Inventário da Destinação de lodo .....	68
6.1.2.3.	Inventário do lançamento de esgoto tratado .....	70
6.1.2.4.	Inventário de Construção das ETEs .....	71
6.2.	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	77
6.3.	Interpretação .....	92
6.3.1.	Análises de Sensibilidade.....	92
7.	CONCLUSÕES .....	109
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O Brasil assumiu a meta de tratar mais de 90% do esgoto sanitário coletado em 2030. Em 2020 atingiu 79,8%, entretanto esse valor corresponde apenas a 52% do volume de esgoto sanitário produzido (em relação ao volume de água distribuída). Por número de municípios, apenas 29%, cerca de 1637 municípios, tratam mais de 20% do esgoto sanitário gerado. O que não acontece por falta de soluções técnicas para o tratamento biológico de esgoto sanitário, favorecidas pelas condições climáticas do Brasil (CHERNICHARO et al., 2018; SNIS, 2021; VON SPERLING, 2016).

No Brasil, 40% das estações de tratamento de esgoto sanitário (ETE) utilizam o tipo Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (Reator UASB), Lagoas de Estabilização (LE) corresponde a 37% das ETES, e o Lodos Ativados (LA) responde por 10%, sendo estas as tipologias mais adotadas. Isto quando se desconsidera os métodos simplificados, fossa séptica seguidas de biodigestor ou filtro anaeróbio (14%), consideradas pré-tratamento (NOYOLA et al., 2012). Quando se considera a população atendida, a tipologia Lodos Ativados alcança o primeiro lugar com 54% de atendimento (BRASIL, 2020a).

Algumas ETES em operação no Brasil combinam 2 destes tipos de tratamento para melhor aproveitar as vantagens de cada um. No Reator UASB, micro-organismos anaeróbios metanogênicos associados a micro-organismos facultativos degradam a matéria orgânica carbonácea a biogás, rico em metano ( $\text{CH}_4$ ), o que permite sua utilização como combustível. Outra vantagem deste tipo de tratamento é a compactidade do reator. As Lagoas de Estabilização podem ser aeróbia, anaeróbia, facultativa e de maturação, de acordo com as populações de micro-organismos a serem estimuladas para a remoção dos poluentes. Todos os tipos de Lagoas de Estabilização demandam uma grande área para aproveitar os recursos ambientais na remoção de matéria orgânica e micro-organismos, principal desvantagem deste conjunto. O Lodos Ativados apresenta a melhor eficiência de remoção de matéria orgânica carbonácea e pode ser projetado para a remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), mas para tal consome energia elétrica e converte cerca de 50% da matéria orgânica em lodo, que precisa ser corretamente destinado (CHERNICHARO et al., 2015; SALIBA; VON SPERLING, 2016; 2017) .

Assim, ao mesmo tempo que as ETES são essenciais para diminuir o lançamento de poluentes nos corpos hídricos, o tratamento não ocorre sem a geração de impactos ambientais adicionais, como os relacionados ao consumo de energia no tratamento, ao consumo de

materiais e de combustíveis fósseis na construção, ao uso e alteração dos recursos naturais na construção e operação, as emissões atmosféricas da operação, e a destinação do lodo gerado nos processos (HERNÁNDEZ-PADILLA et al., 2017). Porém esses fatores são variáveis em decorrências das diversas possibilidades de configuração para uma ETE, e na sua seleção alguns pontos devem ser avaliados, tais como: disponibilidade de espaço para a implantação, disponibilidade e consumo de energia (algumas até produzem energia), destino e quantidade de subprodutos gerados, disponibilidade e qualificação da mão de obra para operação, custos de implantação e de operação, entre outros (CHERNICHARO et al., 2015; OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode orientar melhor na escolha entre diferentes tecnologias, visto que permite comparar os possíveis impactos ambientais gerados em diferentes processos com a mesma finalidade, permitindo a escolha de uma configuração mais sustentável (HERNÁNDEZ-PADILLA et al., 2017; LOPES et al., 2020). Assim como variam as possibilidades de configuração de uma ETE, variam também os danos ambientais e o grau destes danos. Visto que os sistemas de tratamento de esgoto sanitário se diferenciam quanto: (i) a conversão de parte da poluição hídrica em gases causadores do aquecimento global ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_4$ ); (ii) ao risco de eutrofização do solo e das águas por não remover satisfatoriamente o fósforo e o nitrogênio; (iii) a capacidade de remover compostos tóxicos aos seres humanos e animais (COROMINAS et al., 2013).

Além disso, ETEs com processos semelhantes podem apresentar desempenhos diferenciados por influência do clima. Por exemplo, temperaturas locais mais altas estimulam a conversão e a remoção de poluentes e reduzem a necessidade de área requerida para instalação das ETEs em geral (CHERNICHARO et al., 2015; EKAMA, 2010; OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011). Estas diferenças produzem emissões diferenciadas dos poluentes e demandam quantidades diferentes de materiais para a construção e operação que precisam ser considerados quando da avaliação dos impactos ambientais.

Estas variações podem ser consideradas na ACV ao utilizar dados primários (coletados *in loco*) e dados secundários provenientes de estudos brasileiros para a realização do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), etapa de levantamento e quantificação dos itens de entrada e saída de um processo. Esta consideração das particularidades de locais diferentes é chamada Regionalização, e permite a obtenção de dados mais acurados e adequados a realidade local (GUINÉE, 2001; ABNT, 2009).

No caso específico do tratamento de esgotos, a importância da Regionalização da ACV na etapa de inventário de ETEs é corroborada por fatos como os encontrados por Oliveira e Sperling (2011). Estes verificaram que a remoção de nitrogênio de esgoto

sanitário em ETEs estudadas no Brasil, sem a instalação de dispositivos específicos para tal, acontece a taxas superiores do que as indicadas nas bibliografias internacionais da área, o que deve reduzir os potenciais de impactos decorrente da emissão de nitrogênio no Brasil. Assim como a matriz elétrica deve produzir resultados diferenciados numa ACV tendo como cenário o Brasil, visto que grande parte da geração de eletricidade provém de fontes renováveis em uma proporção bem maior do que a mundial (BRASIL, 2020b).

A Regionalização também deve ser aplicada na etapa de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida, na qual as entradas e saídas inventariadas são usadas para estimar os possíveis impactos ambientais. Entretanto, a maior parte dos métodos disponíveis e utilizadas para esta estimativa, consideram a realidade Europeia como um modelo global (BULLE et al., 2019; HERNÁNDEZ-PADILLA et al., 2017).

Desta maneira, para a obtenção de estimativas de impactos ambientais mais acuradas do tratamento de esgoto sanitário, se faz necessário considerar a Regionalização quando da realização de ACV no Brasil. Ainda mais, quando se almeja indicar a alternativa de tratamento de esgoto sanitário de menos danos ambientais para um município de 9767 habitantes no Brasil. Essa população é representativa de um município que trata menos de 10% do esgoto sanitário gerado (SNIS, 2020). Além disso, cerca de 44% dos municípios Brasileiros tem população de até 10 mil habitantes (IBGE, 2021).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral foi estimar os impactos ambientais das três tipologias mais utilizadas no tratamento de esgoto sanitário no Brasil com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) regionalizada.

Estas 3 tipologias respondem por mais de 86% das tipologias adotadas nas ETEs em operação no Brasil.

### 2.2. Objetivo Específicos

Os objetivos específicos deste projeto foram:

- Obter informações regionais para a realização do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), tais como característica do esgoto sanitário e do esgoto tratado, eficiências de remoção, consumo de produtos químicos e de energia elétrica e emissões de cada sistema de tratamento;
- Inventariar a construção dos 3 sistemas de tratamento para atender uma população de 9767 habitantes (população representativa de um município brasileiro que trata menos de 10% do esgoto sanitário gerado);
- Verificar como a Regionalização do ICV e da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) influenciam os resultados da ACV.

### 3. HIPÓTESE E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

As 3 tipologias de tratamento de esgoto mais adotadas no Brasil, Lagoas de Estabilização, Reator UASB e Lodos Ativados, são diferentes entre si, por exemplo, quanto as demandas de área e materiais para construção, os consumos e emissões da fase de operação e a geração de resíduo sólido. Essas diferenças causam diferentes impactos ambientais com diferentes magnitudes.

Globalmente, o Lodos Ativados é a tipologia mais adotada, sendo também a mais avaliada em estudos de ACV. Diferente das duas outras tipologias mais comuns no Brasil, o Lodos Ativados depende do consumo de energia elétrica para a operação e produz mais lodo a ser destinado, mas é o sistema mais eficiente em remoção de matéria orgânica em operação no Brasil. Considerada mais tecnológica ou de maior complexidade, demanda mão de obra especializada para a operação, o que, juntamente com o consumo de energia elétrica e a maior geração de lodo, aumenta os custos operacionais. Ainda assim, a adoção desta tipologia no Brasil aumentou em 7% de 2013 para 2019 (BRASIL, 2020a). Da mesma maneira que tem maior custo operacional, acredita-se que tenha também maiores impactos ambientais do que as outras duas tipologias.

As 3 tipologias respondem bem ao clima quente brasileiro. No caso das Lagoas de Estabilização, há uma redução da área requerida para o tratamento. No caso do Reator UASB, este consegue tratar efluentes bastante diluídos, como o esgoto sanitário, o que não ocorre em regiões de clima frio. O Lodos Ativados pode remover mais nitrogênio, mesmo quando não projetada para tal fim (VON SPERLING; CHERNICHARO, 2007). Assim, como existem estas diferenças em função da temperatura, além de outros fatores Regionais, todos eles podem interferir nos impactos ambientais do tratamento de esgoto sanitário. Como exemplo, tem-se a matriz elétrica, no Brasil as fontes renováveis representam um maior percentual do que na Europa. A Regionalização permite obter resultados mais próximos e adequados a realidade Brasileira. Além disso, a metodologia e os resultados podem servir de base para outros países em regiões de clima quente que, assim como o Brasil, precisam aumentar o índice de tratamento adequado de esgoto em atendimento ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos”.

Desta maneira, a Hipótese a ser demonstrada é que os impactos ambientais do tratamento de esgoto doméstico estimados num cenário Brasileiro, pela Regionalização da ACV, comprovam a relevância das tipologias de menor complexidade, Lagoas de

Estabilização e Reator UASB, contra o a tipologia Lodos Ativados, que também é a mais onerosa para a população.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. ETEs no Brasil

As ETEs instaladas no Brasil têm como principal objetivo a remoção de matéria orgânica (DBO ou DQO). Menos de 22% das ETEs estão preparadas para a remoção/inativação de organismos patogênicos pela adoção de estágios de desinfecção e de lagoas de maturação, com quantidades praticamente iguais destes 2 sistemas. A remoção de nutrientes, nitrogênio e fósforo, como um dos objetivos das ETEs, é praticamente incomum (VON SPERLING, 2016).

Em um país com condições climáticas favoráveis, altas temperaturas e radiação solar, como o Brasil, diversas soluções técnicas para o tratamento de esgoto sanitário podem ser adotadas. Levantamentos atuais reforçam esta diversidade de opções, conforme apresentado a seguir.

De acordo com o número de ETEs, os seguintes tratamentos predominam: (VON SPERLING, 2016)

- I. Lagoa Anaeróbia seguida de Lagoa Facultativa;
- II. Reator Anaeróbio de Manta de Lodo e Fluxo Ascendente (Reator UASB);
- III. Lodos Ativados;
- IV. Lagoas (sem tipificação) seguida de Lagoa de Maturação;
- V. Tanque Séptico.

Ordem parecida foi encontrada por Noyola et al. (2012), que, entretanto, agruparam todas as lagoas como Lagoas de Estabilização e não contabilizaram as fossas sépticas, por serem consideradas pré-tratamento. Chernicharo et al. (2018), que inventariaram apenas as ETEs em operação na Regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, encontraram a seguinte ordem:

- I. Reator UASB;
- II. Lagoas de Estabilização;
- III. Lodos Ativados;
- IV. Tanque Séptico seguido de Filtro Anaeróbio;
- V. Outros;
- VI. Pré-tratamento seguido de emissário.

Assim, podemos concluir, que mesmo considerando as diferenças de amostragem ou a data de realização do levantamento, a diversidade de tipos de tratamento se confirma, assim com os sistemas que podem ser considerados predominantes: Lagoas de

Estabilização, Lodos Ativados e Reator UASB. Estes 3 sistemas serão apresentados nos itens 4.1.1., 4.1.2. e 4.1.3.

#### 4.1.1. Lagoas de Estabilização

As lagoas permitem um baixo custo de tratamento de esgoto sanitário, além da simplicidade e da versatilidade de tratar esgotos sanitários de diferentes qualidades (TJANDRAATMADJA et al., 2013). Não se deve agrupar todos os tipos de lagoas utilizadas para o tratamento de esgoto sanitário (Aerada, Anaeróbia, Facultativa, Maturação) como sendo um único tipo, visto as diferenças entre estas, principalmente quanto as funções (VON SPERLING, 2016). De acordo com este autor, os pontos principais de cada tipo de lagoa são:

As Lagoas Facultativas são lagoas especialmente construídas para o tratamento de esgoto sanitário com capacidade para a retenção do esgoto por vários dias. A matéria orgânica em suspensão se decanta, sendo digerida anaerobicamente pelas bactérias presentes no fundo da lagoa. A matéria orgânica solúvel e a finamente dispersa é digerida aerobicamente, com a utilização de oxigênio produzido por algas fotossintetizantes, o que faz com que a demanda de área seja bastante alta para este tipo de lagoa.

As Lagoas Anaeróbias são utilizadas em combinação com as Lagoas Facultativas, pois possuem uma maior eficiência de remoção de matéria orgânica com ocupação de menos área. Da mesma maneira que na Lagoa Facultativa, a remoção de matéria orgânica se dá no fundo da Lagoa Anaeróbia. Além da menor demanda de área, a combinação de Lagoas Anaeróbias com Lagoas Facultativas tem gerado melhor resultado de remoção de DBO, DQO, de coliformes fecais e de sólidos em suspensão, como foi encontrado por Oliveira; von Sperling (2011), que compararam os resultados médios de 73 Lagoas Facultativas com 43 conjuntos de Lagoas Anaeróbias seguidas de Facultativas em operação no Brasil.

As Lagoas Aeradas podem ser de mistura completa ou facultativas, ambas utilizando aeradores mecânicos em substituição a produção de oxigênio por algas fotossintetizantes. Na mistura completa, a agitação mantém toda a matéria orgânica em suspensão sendo necessário uma lagoa de sedimentação a seguir. Na Lagoa Facultativa Aerada, ainda se tem a formação de uma zona de decantação com degradação anaeróbia, não sendo necessária sedimentação externa.

Completamente diferente são as Lagoas de Maturação, dimensionadas como uma menor profundidade em relação aos outros tipos de lagoas. Esta menor profundidade faz

com que prevaleça condições adequadas a remoção/inativação de organismos patogênicos (vírus e bactérias). Condições como a maior penetração da radiação ultravioleta, maior atividade fotossintética que promove um maior pH do meio e alta densidade ótica, que favorece os microrganismos aeróbios que removem mais eficientemente os patógenos (VON SPERLING, 2007a).

#### 4.1.2. Lodos Ativados

No Brasil, os tratamentos por Lodos Ativados são representados pelos tratamentos em bateladas, convencional e aeração prolongada. Apesar de ser adotado em 10% de ETEs de pequeno porte em operação no Brasil, quando se aumenta o porte das ETEs, a participação deste sistema chega a 35% das ETEs de maior porte (CHERNICHARO et al., 2018).

Na avaliação de diversos sistemas de tratamento de esgoto sanitário em operação na região Sudeste do Brasil, feito por Oliveira; von Sperling (2011), as ETEs Lodos Ativados, quando avaliadas conjuntamente, apresentam os melhores resultados de remoção de matéria orgânica se comparado a outros sistemas, entretanto com resultado abaixo do esperado presente na literatura científica. A eficiência de remoção de nutrientes, nitrogênio e de fósforo, também está entre as melhores e, neste caso, a média de remoção de cada um dos nutrientes está acima do esperado pela literatura.

A alta eficiência de remoção de DBO obtida no sistema Lodos Ativados se deve a alta concentração de biomassa presente no sistema, com uma demanda grande de oxigênio. O oxigênio deve ser fornecido por aeração mecânica ou por meio de difusores alimentados por compressores de ar.

A biomassa é removida por sedimentação, com parte retornando ao sistema. Dessa maneira, os sistemas Lodos Ativados são constituídos de 2 estágios principais, aeração e sedimentação. Nos sistemas convencional e aeração prolongada, a separação da biomassa ocorre no sedimentador secundário. Este é chamado de secundário, porque o sistema convencional tem também um sedimentador primário, antes da aeração, para a remoção de matéria orgânica sedimentável. Outra diferença entre estas 2 variantes, é que a biomassa na aeração prolongada já sai estabilizada devido ao maior tempo de retenção da biomassa, não sendo necessário outro estágio para tal, como na variante convencional. No caso dos sistemas em bateladas, os 2 estágios, aeração e sedimentação, acontecem nos mesmos tanques, mas em momentos diferentes (VON SPERLING, 2016).

#### 4.1.3. Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (Reator UASB)

Devido ao baixo requerimento de área, energia e volume, baixa produção de lodo e a simplicidade de operação, este sistema encontrou seu lugar em regiões de clima favorável (quente), em substituição ao Lodos Ativados de maior complexidade e as diferentes Lagoas, que demandam uma grande área para instalação.

Devido a menor capacidade de remoção de matéria orgânica, de nutrientes e de agentes patogênicos, este sistema deve ser associado a um pós-tratamento, geralmente aeróbio. Ainda assim, o sistema conjunto (Reator UASB + pós-tratamento) apresenta vantagens econômicas, tanto de instalação, quanto de operação em relação ao Lodos Ativados, visto a redução do consumo de energia e de lodo gerado, ambos em equivalente populacional. O Reator UASB também apresenta vantagens econômicas frente as lagoas, visto sua compactidade (CHERNICHARO et al., 2015; SALIBA; VON SPERLING, 2017). Além disso, o tratamento anaeróbio converte a matéria orgânica em biogás (mistura de gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ), que devido a presença de  $\text{CH}_4$  pode ser utilizado para a produção descentralizada de energia (1 metro cúbico de esgoto sanitário pode produzir cerca de 2 MJ) promovendo a sustentabilidade da ETE. Entretanto, atualmente no Brasil, a maior parte do biogás é queimada após coleta em *flare* (ROSA et al., 2018)

Apesar de remover mais DBO do que previsto na literatura, média de 72 %, os reatores UASB em operação na Região Sudeste do Brasil não perdem neste desempenho apenas para o conjunto Fossas Sépticas seguidas de Filtros Anaeróbios. Porém quando considerado os pós-tratamentos, os desempenhos de remoção de DBO, DQO e de sólidos aumentam significativamente atendendo aos parâmetros de lançamento (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011).

Esta breve explanação dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário mais usados no Brasil reforça as diferenças entre estes ainda que compartilhem a mesma função principal (remoção de matéria orgânica do esgoto sanitário antes do lançamento em corpos hídricos), assim para avaliar os ganhos ambientais com o tratamento de esgoto sanitário e compará-los entre si, foi empregada a metodologia Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

## 4.2. Avaliação do Ciclo de Vida

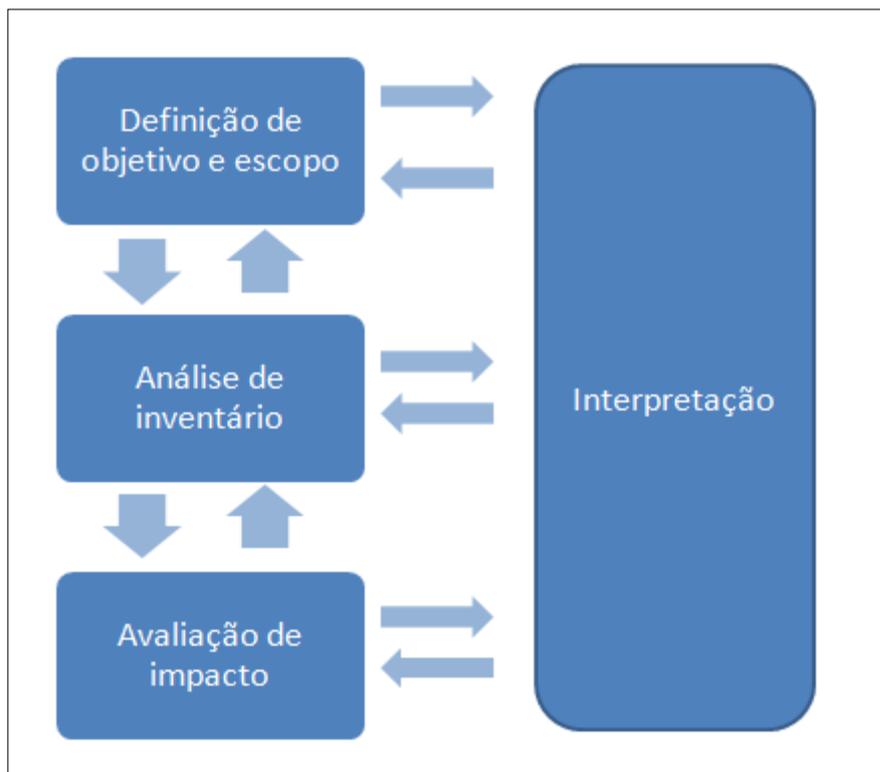
A metodologia Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi desenvolvida a partir da necessidade de pensar os produtos e processos em todo o ciclo de vida, indo além da análise do desempenho ambiental apenas da unidade produtiva. Nesta metodologia, todas as etapas do processo produtivo “do berço ao túmulo” possuem potencial de impacto ao meio ambiente, e estes impactos são avaliados e estimados. As etapas do processo produtivo são: extração de recursos naturais, transformações industriais, utilização do produto, destinação dos resíduos e etapas de transporte para materiais consumíveis, produtos e rejeitos (ABNT, 2009a, 2009b; GUINÉE et al., 2001b; SILVA; KULAY, 2013).

A ACV pode ser aplicada gerando ganhos ambientais na: (i) análise da origem de um problema de um produto (inclui também os processos, neste termo) específico; (ii) comparação de possíveis variações de um produto; (iii) desenvolvimento de novos produtos; (iv) escolha entre produtos diferentes, além de permitir o aperfeiçoamento do desempenho ambiental de produtos já existentes (ABNT, 2009b, 2009a; EMMERSON et al., 1995; GUINÉE et al., 2001b, 2001a; JOLLIET et al., 2018). Um exemplo da comparação entre possíveis variações de um produto foi feita por Foley et al. (2010). Utilizando o Inventário do Ciclo de Vida, esses pesquisadores estimaram a variação dos impactos ambientais decorrentes da adoção de métodos de tratamentos de esgoto sanitário que levassem a um esgoto tratado com maior qualidade (menos matéria orgânica, nitrogênio e/ou fósforo). A partir da avaliação deste trabalho, concluiu-se que ações para a melhoria na qualidade do esgoto sanitário, podem levar a um incremento dos impactos ambientais, no caso da remoção de fósforo e nitrogênio. Fortier et al. (2014) utilizaram a ACV no desenvolvimento de um novo processo, produção de biocombustível para aviões a partir de algas, usando esgoto sanitário tratado como meio de crescimento. A ACV permitiu entender que o local da biorefinaria, local de produção de algas a partir do esgoto sanitário, é peça-chave para a sustentabilidade desta alternativa. A biorefinaria deve ser próxima a Estação de tratamento de esgoto sanitário (ETE), ou o impacto do transporte do esgoto sanitário pode anular a redução dos gases de efeito estufa (GHG) da substituição dos combustíveis fósseis no transporte aéreo.

Quando se compara o desempenho ambiental de produtos obtidos de forma diferente (matéria-prima, local, processo etc.), estes devem apresentar uma mesma função (ABNT, 2009b, 2009a; GUINÉE et al., 2001a, 2001b); SILVA; KULAY, 2013). Ademais, para

que os objetivos da ACV possam ser alcançados, e os resultados utilizados e consistentes, se faz necessário que a ACV seja realizada atendendo a requisitos e orientações consolidados nas normas ISO (internacional) ou nas normas NBR 14040 e 14044. Em relação a estrutura, a ACV tem quatro etapas que se relacionam entre si, conforme apresentado na Figura 1.

**Figura 1** - Fases da ACV e suas interrelações.



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2009b, 2009a; GUINÉE et al., 2001a, 2001b))

A etapa Definição de objetivo e escopo deve delimitar o objeto de estudo da ACV, definindo a forma e conteúdo do estudo, os impactos que serão caracterizados, o local de estudo, e a forma de apresentação da ACV. Conjuntamente nesta etapa, se estabelece a função do produto (serviço prestado pelo processo ou produto), a unidade funcional (unidade básica para as quantificações) e as fronteiras do sistema (limites que delimitam o sistema, ambientalmente e economicamente). Também deve se declarar o nível de profundidade que será adotado, as suposições e as limitações do estudo (ABNT, 2009b, 2009a; JOLLIET et al., 2018). Nesta etapa, também se define se a ACV incluirá todas as fases do ciclo de vida “do berço ao túmulo” ou especificar as fases que serão estudados. Diferenças nesta etapa inicial, levam a resultados divergentes em estudos ditos iguais, o que reforça a necessidade

de transparência na definição e comunicação de todos os elementos (COLTRO, 2007; COROMINAS et al., 2013).

A função do produto (ou processo) deve ser definida claramente pois outros passos são consequências deste, sobretudo o estabelecimento da unidade funcional e das fronteiras do sistema com impactos nos resultados da ACV. Para melhor ilustrar, uma estação de tratamento de esgoto sanitário (ETE) tem como função prevenir a poluição do meio ambiente pela remoção dos poluentes do esgoto sanitário. Entretanto, o poluente foco a ser removida pode englobar matéria orgânica, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e/ou, mais recentemente, os micro poluentes (compostos químicos que em pequenas quantidades causam efeitos ecológicos indesejáveis (EGGEN et al., 2014).

Rodriguez-Garcia et al. (2011) compararam os resultados de 2 conjuntos de ACV aplicados a 6 tipos de ETEs, o 1º conjunto com função prioritária de remover a matéria orgânica e com unidade funcional (UF) volume de esgoto tratado em metro cúbico ( $m^3$ ) e o 2º conjunto com função prioritária de remover nutrientes, com UF em fosfato equivalente ( $kg PO_4 eq.m^{-3}$ ) removido. Assim, para a função remoção de matéria orgânica e UF  $m^3$  de esgoto, as ETEs do tipo 2 (com remoção de matéria orgânica e nutrientes) e do tipo 6 (com esgoto sanitário de maior qualidade utilizado para recarregar aquíferos) apresentaram os piores resultados para potencial eutrofizante e potencial de aquecimento global. Já no 2º caso, com UF em  $kg PO_4 eq.m^{-3}$  removido, o pior resultado foi da ETE tipo 1 (dirigida para a remoção de matéria orgânica) para os 2 impactos quantificados.

Na etapa de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) se quantifica os consumos e as emissões do ciclo de vida de um produto ou de um processo, a partir da elaboração de um fluxograma do processo. As entradas e saídas a serem utilizados no Inventário podem vir de dados primários (ou *foreground*), obtidos em campo (local de produção e laboratórios, por exemplo) a partir de entrevistas, relatórios e literatura técnica; ou de dados secundários (ou *background*), como relatórios setoriais e bancos de dados. Pode-se também fazer a utilização conjunta dos dois tipos de fontes de dados. Ademais, a qualidade, a representatividade e a confiabilidade das informações coletadas impactam profundamente na qualidade da ACV (ABNT, 2009a, 2009b; GUINÉE et al., 2001a, 2001b; SILVA; KULAY, 2013).

Apesar de aparentemente simples, a coleta de dados demanda um grande esforço, que pode ser minimizado parcialmente pela utilização de bancos de dados. Um exemplo é o *Ecoinvent*<sup>®</sup>, que consolida informações de diferentes bancos de dados regionais, tornando-se cada vez mais completo. Assim, pode ser guardado o esforço para o

levantamento das entradas e saídas de dados específicos do produto/processo em estudo. As incertezas dos dados adotados, sejam primários ou secundários, podem ser quantificadas pela aplicação da análise de incerteza. No caso da utilização do *Ecoinvent*<sup>®</sup>, as incertezas podem ser calculadas diretamente para o inventário do processo, utilizando metadados, incertezas de cada entrada e saída e análises estatísticas (JOLLIET et al., 2018)

Na etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida(AICV), as entradas e saídas levantadas na fase de inventário são relacionadas a diferentes impactos ambientais (classificação) e quantificadas (caracterização) após seleção das categorias de impacto (efeitos), dos indicadores de categoria (forma de apresentação de uma quantidade do efeito) e dos modelos de caracterização (formas de relacionar os dados do Inventário aos possíveis efeitos) (SILVA; KULAY, 2013). Para a AICV, podem ser utilizados diversos métodos que apresentam diferentes categorias de impacto, indicadores de categoria e fatores de caracterização para a caracterização (quantificação). Os métodos também podem apresentar diferentes abrangências, indo da regional (continente, país ou região) à abrangência global (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Quanto às categorias de impacto, os métodos de AICV podem ser divididos em “*midpoint*”, “*endpoint*” e combinado. Na abordagem “*midpoint*”, ou intermediária, os indicadores estão localizados ao longo do mecanismo ambiental (causa e efeito). Enquanto na abordagem “*endpoint*”, ou final, os indicadores de categoria são danos finais ao meio ambiente, também chamados de problemas, como consumo de recursos naturais e impactos à saúde humana. Diferentes categorias de impacto intermediárias podem ser agregadas e relacionadas para a obtenção das categorias de impacto finais. Em relação as incertezas, as categorias de impacto intermediárias permitem a obtenção de valores mais acurados, contudo apresentam interpretação mais vaga dos impactos. Já as categorias de impacto finais são indicadores mais incertos por envolverem mais assunções, porém são mais fáceis de serem interpretadas. Desta maneira, Impacto à saúde humana e Esgotamento das reservas de elementos são exemplos de categorias de impacto dos métodos “*endpoint*”; Toxicidade humana e Depleção de recursos abióticos, por sua vez, são exemplos de categorias de impactos dos métodos “*midpoint*”. Os métodos combinados agregam indicadores de categoria intermediários e finais. A seleção das categorias de impacto a serem quantificadas deve condizer com os problemas ambientais do sistema de produto (ABNT, 2009b, 2009a; GUINÉE et al., 2001a, 2001b); JOLLIET et al., 2018; MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Algumas categorias de impacto frequentemente avaliadas e suas interpretações são apresentadas a seguir e foram extraídas das informações complementares do *Impact World+* (PATOILLARD; BULLE; MARGNI, 2019):

- **Mudança climática:** Se baseia no fato que gases do efeito estufa (*greenhouse gas emission* – GHG) tem sua concentração aumentada na atmosfera com efeito radiativo positivo, o que pode causar efeitos climáticos como o aumento da temperatura e mudança nas precipitações. A categoria de impacto de curto termo adota o índice Potencial de aquecimento global num horizonte de 100 anos (GWP100), este é relativo aos efeitos de um rápido aumento da temperatura demandando adaptações rápidas dos seres vivos. A categoria de longo termo adota o índice Temperatura global potencial num horizonte de 100 anos (GTP100), este é relativo aos efeitos cumulativos do aquecimento, por exemplo o aumento do nível dos oceanos. Ambos os índices foram propostos pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e são adotados pelos diferentes métodos. As categorias de impacto finais com impacto a saúde humana relacionam essas alterações ao potencial risco de morrer de certas doenças agravadas por alagamentos. Por exemplo, malária, doenças cardíacas e diarreia. No caso de impacto a qualidade dos ecossistemas, são relacionadas a um prognóstico de ritmo de perda de espécie por área superficial.
- **Acidificação:** tem origem no fato de que substâncias acidificantes são emitidas para a atmosfera, se dispersando e reagindo com outras substâncias por longas distâncias, até finalmente se depositarem na água ou no solo. Esses destinos podem ter níveis de acidez alterados, prejudicando as espécies que tem pH ótimos de desenvolvimento. No caso da acidificação marinha, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros compostos químicos emitidos, formam ácido carbônico em contato com a água. A posterior dissociação dos íons formados leva a uma redução na quantidade de íon carbonato disponíveis para organismos calcificados, como os corais e alguns plânctons. A acidificação terrestre e da água doce são causadas por óxidos de nitrogênio, amônia e dióxido de enxofre sendo estimada a partir da concentração emitida destes. Enquanto a acidificação marinha tem a concentração de CO<sub>2</sub> estimada de maneira semelhante a categoria mudança climática.
- **Uso de reserva mineral e fóssil:** se baseia na premissa de que o uso dessas reservas reduz a disponibilidade dessas para as futuras gerações. A reserva de material fóssil, por ser geralmente usado como fonte energia, é medida em unidade de energia faltante por unidade de energia consumida, ambas em Megajoule (MJ).

- Eutrofização: ocorre devido ao aumento de nutrientes nos corpos hídricos levando ao crescimento de produtores primários, o que altera a abundância e a diversidade das espécies. Em casos extremos pode causar a redução da concentração de oxigênio na água doce e áreas costeiras. O fósforo é considerado como o nutriente limitante em águas doces e o nitrogênio como o limitante em águas marinhas costeiras, sendo adotados como unidades de medida para a eutrofização de água doce e marinha, respectivamente. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) também são contabilizadas para a eutrofização de água doce.
- Toxicidade: segue a premissa de que substâncias químicas emitidas para o ar, água ou solo podem apresentar efeitos tóxicos para a saúde humana e os ecossistemas (ecotoxicidade, nesse caso). Os seres vivos podem ter contato com essas substâncias, por exemplo, por meio da inalação de ar, ingestão de alimentos ou água, podendo impactar a saúde e causar doenças nos seres vivos. A combinação de destinos (ar, água ou solo), de exposição e dos efeitos de cada substância química é usada para estimar os efeitos tóxicos a saúde humana e aos ecossistemas. No caso da toxicidade humana, estima-se o aumento na morbidade por doenças cancerígenas ou não cancerígenas. Para a ecotoxicidade, o potencial de espécies afetadas é estimado. Ambas as toxicidades, humana e de ecossistemas, são estimadas no curto prazo (até 100 anos) e no longo prazo (maior que 100 anos) para substâncias persistentes, como os metais.
- Formação de material particulado: baseia-se no fato de que a inalação de partículas menores que  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ) causa problemas de saúde e redução da expectativa de vida, uma fração dessa devida aos materiais particulados com dimensão entre  $2,5$  e  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). Doenças respiratórias agudas e crônicas, cardiovasculares, diabetes e câncer são exemplos dos problemas de saúde causados pela inalação de particulados. Os materiais particulados podem ser primários (sulfato de amônio e nitrato de amônio, por exemplo) ou secundários, estes últimos formados a partir da oxidação de gases primários como os óxidos de enxofre e de nitrogênio. Os fatores de caracterização são obtidos a partir de fatores epidemiológicos.
- Disponibilidade de água: baseado no modelo de escassez de água AWARE que estima a água restante após consumo de seres vivos (humanos e ecossistemas aquáticos e terrestres) considerando as bacias hidrográficas existentes. Uso por competidores, capacidade de adaptação das espécies e usos da água são parâmetros usados para a conversão do AWARE em disponibilidade de água para humanos e ecossistemas (de água doce e terrestre).

A etapa de Interpretação amarra todas as etapas anteriores ao verificar os impactos das escolhas e das decisões tomadas, as incertezas possíveis e a adequação na execução em consonância ao objetivo e escopo definidos, além de apontar pontos para a redução dos impactos do produto em análise. Para isto, se utiliza as verificações de completeza, de consistência e de sensibilidade, e a identificação de questões significativas. Estas análises levam as conclusões do estudo, a identificação de limitações e a recomendações para novas ACVs (ABNT, 2009b, 2009a; COROMINAS et al., 2013; JOLLIET et al., 2018).

Ademais, esta etapa engloba a realização facultativa da Normalização (relação da carga ambiental do produto ao todo), do agrupamento (das categorias de impacto similares) e da ponderação (atribuição de importância as categorias de impacto pela utilização de fatores numéricos que permitem a agregação de resultados de diferentes categorias (ABNT, 2009a; JOLLIET et al., 2018)

A fim de evitar que esta etapa, Interpretação, seja feita às pressas ou de forma superficial, Jolliet et al. (2018) sugerem que esta seja realizada em diferentes níveis, tais como:

- Ao final de todas as demais etapas para averiguação da realização destas, um possível significado das flechas de duas vias ( $\longleftrightarrow$ ) da Figura 1;
- Para verificação da completude do inventário;
- Para analisar a contribuição de cada uma das fases do ciclo de vida avaliadas (obtenção de matérias-primas, processamento e fim de vida, por exemplo);
- Uma forma de examinar o encargo ambiental de cada etapa do processo considerada, ou de cada parte do produto, como exemplificado pelo computador e suas partes (teclado, monitor e CPU);
- Identificação de qual entrada ou emissão do inventário gera a maior contribuição para cada categoria de impacto quantificada.

Entende-se que esses pontos recapitulados nessa revisão do tema ACV sejam os de maiores importância quando da aplicação dessa metodologia para a estimativa de impactos ambientais, visando a comparação de diferentes processos com uma mesma finalidade.

### 4.3. Regionalização

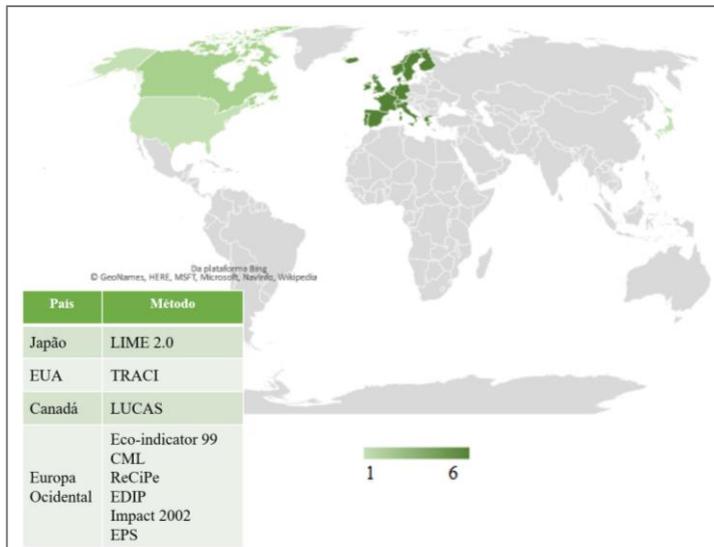
A Regionalização da ACV pode ser obtida pelo uso de dados regionais para a realização do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) de um dado processo, e pela utilização de Fatores de Caracterização (FC) regionais, que consideram a variabilidade espacial na Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV). Ambas as vias permitem a obtenção de resultados mais acurados para a ACV (HERNANDEZ-PADILLA et al. 2017).

As ETEs, por serem na sua grande maioria processos biológicos, também apresentam variações no desempenho por influência do clima, o que deve levar a resultados diferenciados na ACV. De forma geral, o clima tropical (com temperaturas elevadas ao longo do ano e maior incidência solar) estimula o desempenho dos sistemas biológicos, aumentando a remoção dos poluentes e diminuindo o requerimento de áreas para a construção (CHERNICHARO et al., 2015; OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011). Além disto, mesmo as ETEs sem projeto específico para a remoção de nutrientes (N e P), podem apresentar melhor remoção de nitrogênio, visto que esta remoção é estimulada em regiões de clima mais quente, como o brasileiro, facilitada pelo desenvolvimento dos micro-organismos nitrificantes (1ª fase do processo de remoção de nitrogênio) (EKAMA, 2010; HAANDEL; LUBBE, 2012).

Em relação a etapa de AICV, os métodos de quantificação dos impactos mais comumente utilizados foram desenvolvidos para regiões específicas. De forma geral, estes consideram apenas a região onde o fluxo elementar acontece, sem levar em conta que algum estágio acontece em outras regiões do mundo. Ademais não considera variabilidade espacial para a obtenção FCs. É possível verificar por meio da Figura 2, regiões cobertas por um mesmo método de avaliação e as diversas áreas que não foram consideradas pelos métodos mais comuns (BULLE et al., 2019).

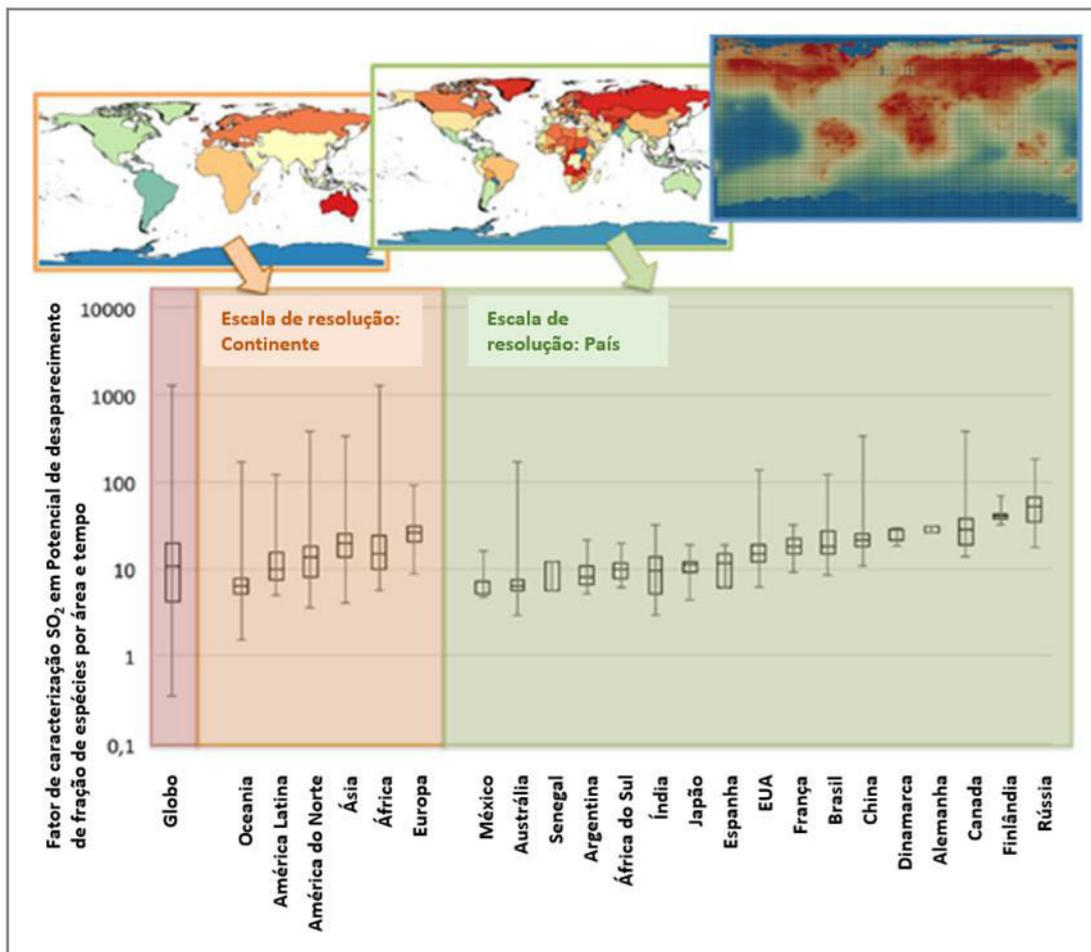
O efeito do uso de fatores de caracterização variáveis com a localidade foi quantificado por Bulle et al. (2019) após o desenvolvimento do método *IMPACT World+*, que considera a variabilidade espacial na obtenção dos FC. Neste trabalho, essas variações chegaram a 10 se comparados um país com a região/continente no qual está inserido, como pode ser observado na Figura 3 utilizada pelos autores para exemplificar, usando o impacto Acidificação terrestre.

**Figura 2** – Regiões e Países com números de métodos disponíveis (principais) para quantificação dos impactos.



Fonte: Própria autora.

**Figura 3** – Exemplo de diferença de magnitude no FC de acordo com a região considerada.



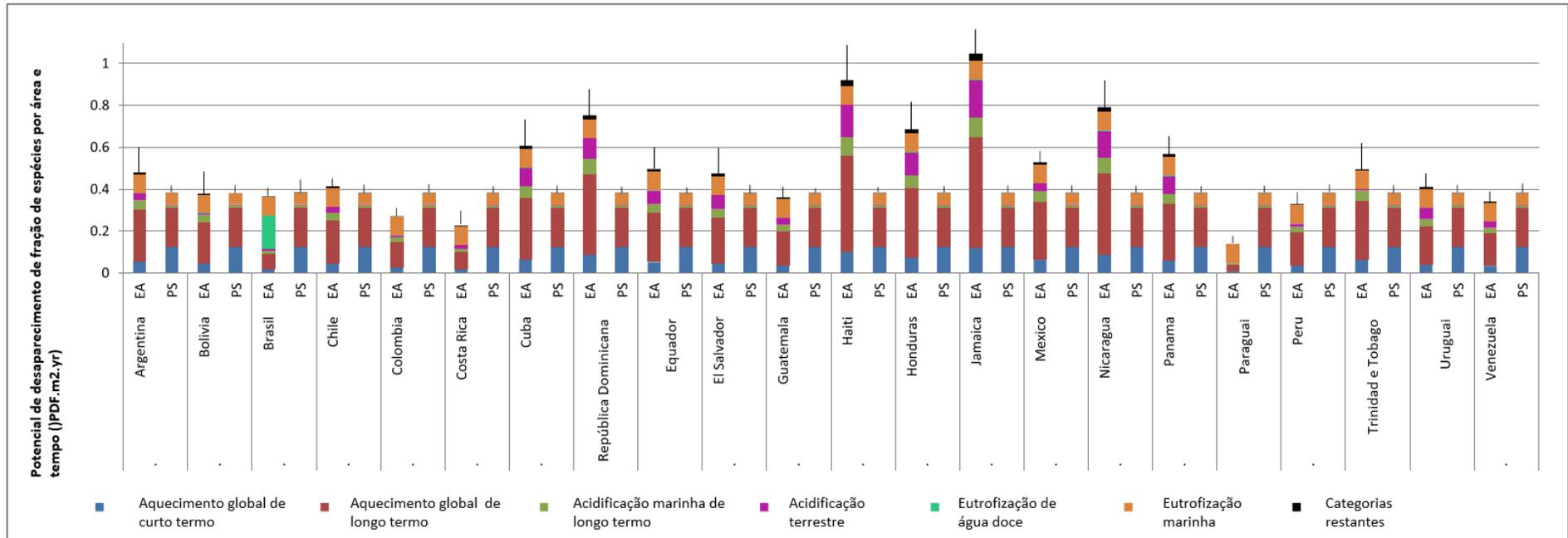
Fonte: Bulle et al. (2019).

No trabalho de Hernández-Padilla et al. (2017), que utilizaram a Regionalização do inventário e a estimativa dos fatores de caracterização para a aplicação da ACV em 2 tipos de ETEs, lagoa facultativa e lodos ativados com aeração prolongada, nos diferentes países da América Latina e Caribe. Foram encontradas variações muito grandes na obtenção dos fatores de caracterização dos impactos do tratamento de esgoto sanitário entre os países desta região, quando considerado apenas as entradas e saídas relacionadas a matriz energética específica e aos dados locais de emissão de fósforo de cada país. O que levou a diferenciação dos resultados da ACV, na qual, por exemplo, o Paraguai que tem FCs de  $1,23 \cdot 10^{-1}$  devido ao fósforo (P) e de  $8,91 \cdot 10^{-4}$  devido a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), ambos FCs em Potencial de desaparecimento de fração de espécies por área e tempo por peso de P ou DBO em Kg (PDF  $m^2 \text{ yr/kg}$ ), apresentou a menor contribuição aos danos para a qualidade dos ecossistemas em razão da categoria eutrofização de água doce. Entretanto o Brasil, que é mais sensível a emissão de P, com FCs de 15,689 devido ao fósforo e de  $1,13 \cdot 10^{-1}$  devido a DBO, ambos em PDF  $m^2 \text{ yr/kg}$ , a categoria eutrofização de água doce apresentou a maior contribuição aos danos para a qualidade dos ecossistemas, cerca de 1/3 dos danos.

Quando se olha as diferenças por conta do percentual de utilização de fontes fósseis para a produção de eletricidade, o Paraguai apresentou os melhores somatórios das classes de impactos avaliados sobre a saúde humana e a qualidade dos ecossistemas, enquanto a Jamaica, apresentou os piores. Parte da diferença, nesta comparação, se dá pelo fato de que o Paraguai utiliza apenas hidro geração de energia e a Jamaica gera 92% da energia a partir de combustíveis fósseis (óleo). As variações nos resultados da ACV de todos os países estudados podem ser verificadas na Figura 4.

As diferenças de desempenho geralmente encontradas no Brasil, gerando diferentes emissões e requerimentos de área, e a diferente matriz energética ressaltadas anteriormente, entre outras, justificam a necessidade de mais estudos locais que considere estas particularidades a fim de verificar se influenciam os resultados. Esses trabalhos mostram que a Regionalização, do inventário e dos fatores de caracterização, proporciona diferenças significativas nos resultados dentre de um mesmo continente/região e, portanto, a Regionalização da ACV deve ser adotada.

**Figura 4** – Comparação dos resultados de ACV regionalizada de ETEs em diferentes países da América Latina e Caribe para dois tipos de tratamentos: Lodos Ativados com aeração prolongada (EA) e Lagoas de Estabilização (PS).



Fonte: Hernandez-Padilla et al. (2017).

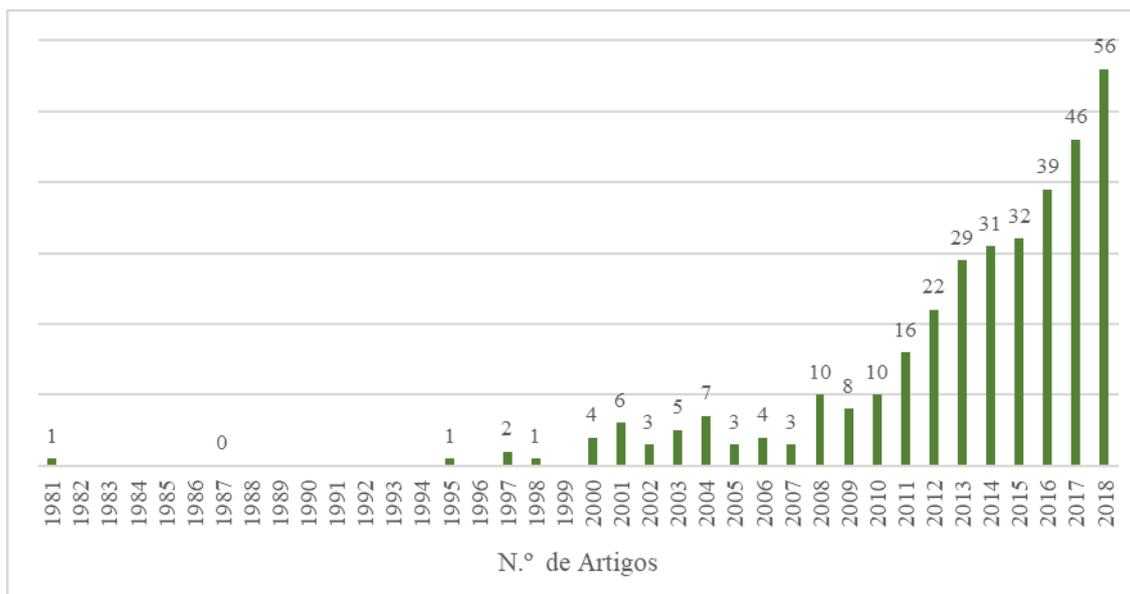
#### 4.4. Avaliações do Ciclo de Vida e o tratamento de esgoto sanitário

Uma análise bibliométrica, ao utilizar dados sobre autores e publicações relacionadas, permite a identificação de lacunas e tendências num dado campo de estudo, encorajando a revisão e a consolidação das direções existentes, da mesma forma que permite a exploração de novos caminhos (FILSER; DA SILVA; DE OLIVEIRA, 2017; OECD, 2013). Assim, em 2018, foi feita análise bibliométrica sobre a aplicação de ACV em ETEs para a estruturação desta revisão bibliográfica e visando justificar a realização deste trabalho.

Os dados apresentados a seguir foram obtidos a partir da pesquisa na base de dados *Scopus* e *Web of Science* (WOS) no início de 2018, e utilizando os seguintes parâmetros de busca: período de publicação (2008 a 2017) e “(“*life cycle assessment*” or *LCA* or *LCI* or “*life cycle inventory*”) and (*WWTP* or “*wastewater treatment plant*” or “*waste water treatment plant*” or *STP* or “*sewage treatment plant*”)”. Como o *Scopus* apresentou mais artigos e mais citações, os dados desta base foram usados na análise bibliométrica.

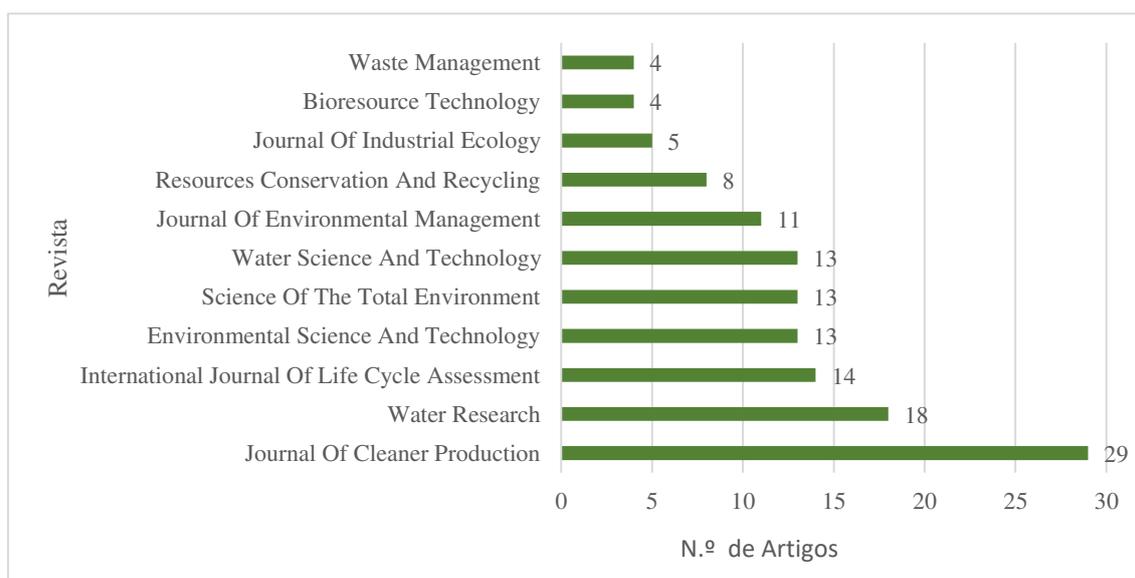
Além da análise bibliométrica, foi definido os 30 artigos mais citados, após consolidação de ambas as bases de dados, *Scopus* e *WOS*. Os 30 artigos mais citados foram lidos e analisados para obter como foram abordados os principais elementos da ACV. Esses 30 artigos representam 16% das publicações encontradas e 59% do total de citações de artigos no campo e período limitado. Okubo (1997), em publicação sobre Bibliometria, não previu uma análise tão aprofundada, que fosse além dos dados das bases de dados. Assim, não foi encontrada uma definição sobre a amostragem a ser aplicada, e esta abordagem e esse número de artigos foi definido arbitrariamente, mas com a ideia de ampliar a amostragem vista em outros trabalhos que aplicaram essa metodologia (OLIVEIRA, 2016, 2016; ILSER; DA SILVA; DE OLIVEIRA, 2017) .

Os primeiros artigos publicados a respeito da aplicação da metodologia Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em estações de tratamento de esgoto sanitários (ETEs) remetem ao início da década de 90, entretanto apenas em 2008 que este assunto alcançou uma média de 10 publicações por ano, e a partir de então, o interesse tem se mostrado crescente, conforme apresentado na Figura 5.

**Figura 5** - Número de artigos encontrados na base de dados Scopus.

Fonte: Scopus

Em relação as revistas utilizadas para a divulgação dos estudos de ACVs em ETEs, a revista *Journal of Cleaner Production* se destaca com 29 artigos no período. Importante destacar que apenas 1 das 11 revistas que mais publicaram esses artigos tem foco exclusivo na metodologia ACV, como pode ser observado pelos títulos destas revistas na Figura 6. Este resultado se mantém quando se avalia as 77 diferentes revistas que publicaram os artigos de ACV em ETEs.

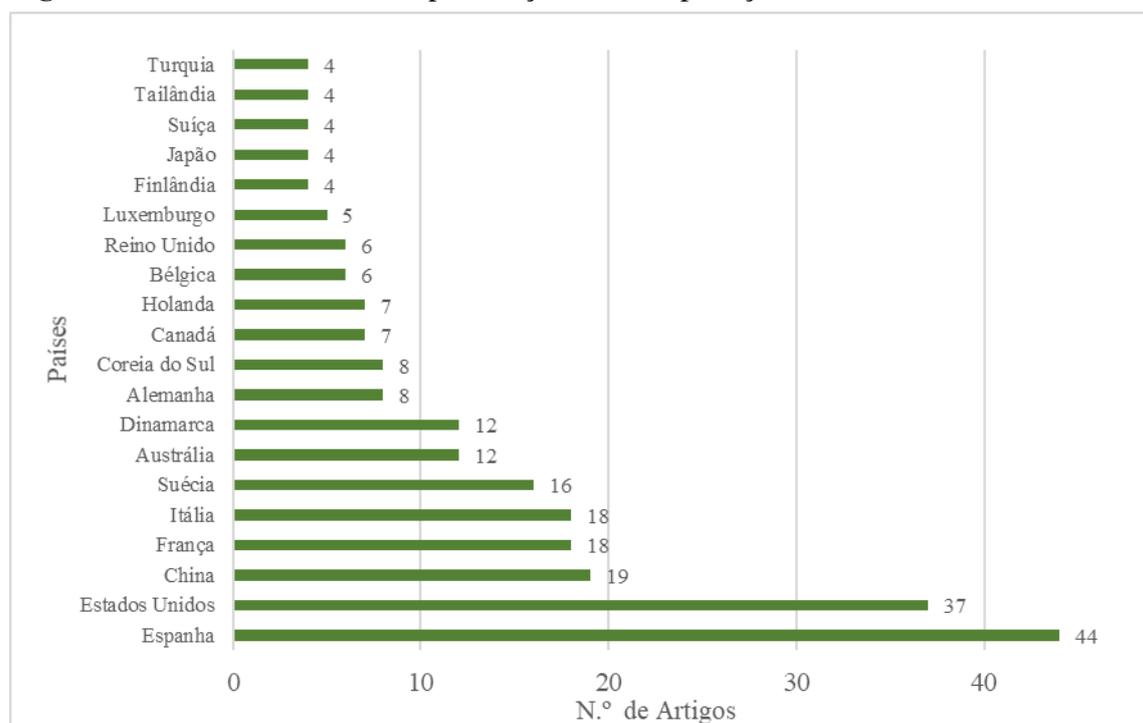
**Figura 6** – Principais revistas utilizadas para a divulgação dos resultados de ACVs em ETEs.

Fonte: Scopus

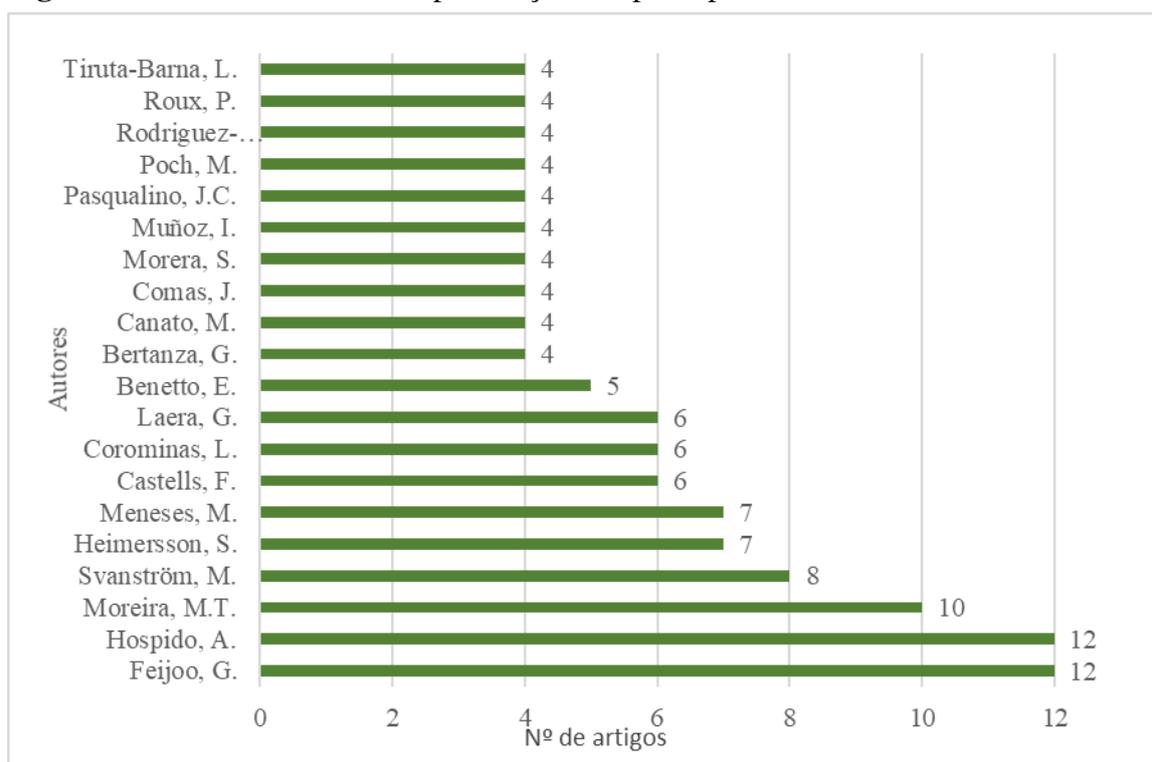
Dentre os 48 países e territórios que tem pesquisadores que publicaram sobre o assunto ACV em ETEs, a Espanha aparece em primeiro lugar com 44 artigos, seguido dos Estados Unidos com 37 (Figura 7). A Argentina é o país latino-americano que primeiro aparece nesta relação, empatada com outros países na 25ª posição, com 2 artigos. Brasil, Peru e México são outros países americanos que constam da lista com apenas 1 artigo cada.

Esta liderança da Espanha é devida ao fato que 5 entre os 10 principais autores, em número de artigos publicados, são vinculadas as universidades Espanholas, sendo que os 3 primeiros, Feijoo, Hospido e Moreira, são vinculados à Universidade de Santiago de Compostela. Os nomes dos 20 autores que mais publicaram sobre ACV em ETEs estão apresentados na Figura 8.

**Figura 7** – 20 Países líderes em publicações sobre aplicação de ACV em ETEs.



Fonte: Scopus

**Figura 8** – Nomes e números de publicação dos principais autores sobre ACV em ETEs.

Fonte: Scopus

Partindo para uma observação mais aprofundada dos 30 artigos mais citados a respeito de ACV em ETEs (Tabela 1), 26 artigos descrevem a aplicação da ACV em ETEs e apenas 4 são revisões, essas utilizam abordagens diferentes entre si. Na primeira revisão em número de citações, Corominas et al. (2013), os autores avaliaram e agruparam 45 artigos desenvolvendo uma linha histórica sobre ACVs em ETEs. Ademais, verificaram o atendimento destes trabalhos a ISO 14040. O relativo baixo número de artigos considerados neste trabalho se deve aos autores terem excluídos artigos que tratavam apenas do tratamento e disposição do lodo. A segunda revisão deste grupo, Mo, Zhang (2013), trata da reciclagem de energia, nutrientes e água, com vantagens e desvantagens sendo levantadas em termos de resultados de ACV. No trabalho de Desloover et al. (2012), os autores se atem a geração e emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ). De acordo com estes, estima-se que o tratamento de esgoto sanitário seja responsável pela emissão de 10% de todo  $N_2O$  de origem antropogênica, sendo que este gás apresenta potencial de aquecimento global (GHG) 300 vezes maior que o  $CO_2$ . Os autores propuseram um método para a quantificação e discutem alternativas para a redução da emissão de óxido nitroso. Para finalizar as revisões presentes entre os 30 artigos mais citados que tratam de ACVs em ETEs, o objetivo do artigo Boldrin et al., (2011) foi apresentar o *EASEWASTE*,

nova alternativa para a avaliação de impactos ambientais de resíduos sólidos dentre estes, o lodo de ETE. Os próximos parágrafos apresentam pontos específicos necessários para aplicação da ACV, porém focados, principalmente, mas não exclusivamente, nestes artigos mais citados e, excluindo-se essas 4 revisões, Corominas et al. (2013), Mo, Zhang (2013), Desloover et al. (2012) e Boldrin et al. (2011).

**Tabela 1** - 30 artigos mais citados de ACV em ETEs de acordo com a análise bibliométrica realizada

Nº	Artigo		Revista	Nº de citações
1	Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems	Foley et al. (2010)	Water Research	144
2	Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art	Corominas et al. (2013)	Water Research	136
3	Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants	Rodriguez-Garcia et al. (2011)	Water Research	112
4	Hybrid life-cycle environmental and cost inventory of sewage sludge treatment and end-use scenarios: A case study from China	Murray et al. (2008)	Environmental Science and Technology	108
5	An introduction to the life cycle assessment (LCA) of bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy and product generation: Relevance and key aspects	Pant et al. (2011)	Renewable and Sustainable Energy Reviews	102
6	Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations	Gallego et al. (2008)	Resources, Conservation and Recycling	91
7	LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant	Pasqualino et al. (2009)	Environmental Science and Technology	90
8	Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment	Muñoz et al. (2008)	Chemosphere	83
9	Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications	Meneses et al. (2010)	Chemosphere	75
10	Energy-nutrients-water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants	Mo, Zhang (2013)	Journal of Environmental Management	73
11	Strategies to mitigate N <sub>2</sub> O emissions from biological nitrogen removal systems	Desloover et al. (2012)	Current Opinion in Biotechnology	71
12	A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain)	Hospido et al. (2008)	International Journal of Life Cycle Assessment	71

*Continua*

Nº	Artigo		Revista	Nº de citações
13	Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment. A focus on toxicity-related impacts	Muñoz et al. (2009)	Science of the Total Environment	61
14	Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach	Amores et al. (2013)	Journal of Cleaner Production	59
15	Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives	Pasqualino et al. (2011)	Journal of Industrial Ecology	58
16	Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae	Fortier et al. (2014)	Applied Energy	56
17	Elimination of pharmaceutical residues in biologically pre-treated hospital wastewater using advanced UV irradiation technology: A comparative assessment	Köhler et al. (2012)	Journal of Hazardous Materials	50
18	Comparative assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery	Nakakubo et al. (2012)	Journal of Cleaner Production	50
19	Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands	Uggetti et al. (2011)	Water Research	45
20	Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE	Boldrin et al. (2011)	Waste Management	43
21	Sustainability assessment of advanced wastewater treatment technologies	Høibye et al. (2008)	Water Science and Technology	42
22	Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives	Flores-Alsina et al. (2010)	Journal of Environmental Management	41
23	Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis	Niero et al. (2014)	Journal of Cleaner Production	40
24	Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China	Liu et al. (2013)	Science of the Total Environment	35
25	Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant: Improvements through DEMON and co-digestion	Schaubroeck et al. (2015)	Water Research	34
26	Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems	Wang et al. (2013)	Environmental Science and Technology	34

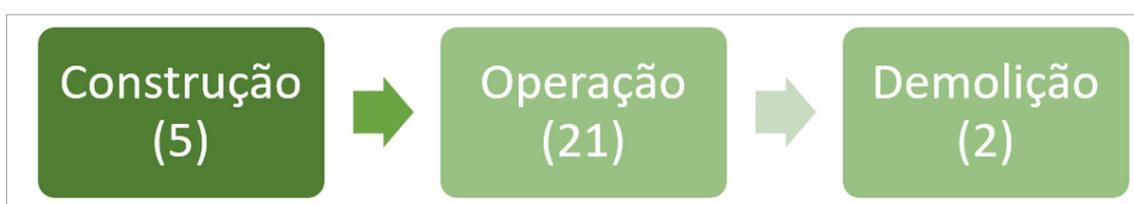
*Continuação*

Nº Artigo		Revista	Nº de citações
27	Using Life Cycle Assessment to Evaluate Green and Grey Combined Sewer Overflow Control Strategies	De Sousa et al. (2012)	33
28	Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method	Lorenzo-Toja et al. (2015)	32
29	Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China	Xu et al. (2014)	31
30	Life cycle assessment of algal biofuels: Influence of feedstock cultivation systems and conversion platforms	Handler et al. (2014)	30

Fonte: Scopus.

Um dos primeiros trabalhos de ACV em ETEs, Emmerson et al. (1995), concluiu que os impactos da fase de construção e demolição podem ser significativos em caso de adoção de sistemas de tratamento mais simplificados, como os filtros biológicos comparados a um sistema de Valas de Oxidação. Para examinar esses sistemas, os autores utilizaram uma avaliação holística pioneira dos impactos ambientais do tratamento de esgoto sanitário, ao considerar os impactos ambientais das 3 fases de uma ETE (construção, operação e demolição) e os fluxos de materiais e energia consumidos. Dentre os 30 artigos mais citados, publicados no período de 2008 a 2017, apenas 5 consideram a fase de construção e apenas 2 a fase de demolição, como pode ser observado na Figura 9. Essas exclusões são feitas, na maioria das vezes, sem apresentar uma justificativa para tal ou até mesmo sem esclarecer as fases consideradas. Os trabalhos de Gallego et al. (2008) e Murray, Horvath, Nelson (2008) diferem por justificar que a fase de operação apresenta a maior parte dos impactos ambientais do ciclo de vida de um sistema de tratamento de esgoto sanitário. Como a maioria dos trabalhos foram realizados em ETEs com tratamento por Lodos Ativados e suas variantes, que possui um grau tecnológico elevado, esta exclusão pode ser subentendida pela mesma justificativa de Gallego et al. (2008) e Murray, Horvath, Nelson (2008), e, possivelmente, baseado nos resultados de Emmerson et al. (1995).

**Figura 9** - Número de artigos que consideram cada um dos 3 estágios do ciclo de vida dos sistemas de tratamento de esgoto sanitários.

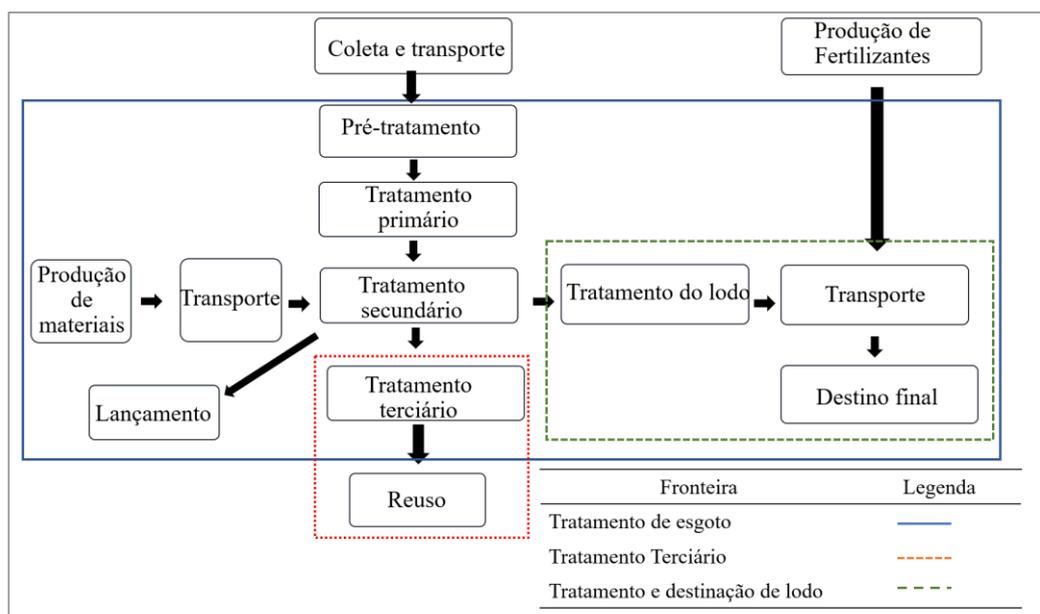


Fonte: Própria autora.

Na realização de uma ACV, de acordo com as normas NBR 14040 e 14044, um dos passos principais e que permite ou não a utilização da ACV para comparação de diferentes processos é a etapa de definição da função do produto, visto que apenas processos com a mesma função podem ter seus resultados comparados (ABNT, 2009a, 2009b). No caso dos artigos avaliados, a maioria estabelece a “remoção de poluentes” como a função do processo, seguidos de longe das funções “fonte de lodo como matéria-prima substituta”, “substituição de fonte de água potável”, “geração de energia” e “tratamento de água pluvial”. Os artigos, as funções dos processos e as Unidades Funcionais (UFs) podem ser observados na Tabela 2.

A definição das fronteiras de um processo é outro ponto que precisa ser claro quando da Definição dos Objetivos e Escopo, Fase 1 da ACV. Nestes trabalhos, 30 artigos mais citados, nota-se que as fronteiras dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário podem variar desde uma etapa do tratamento, como por exemplo os diferentes tratamentos terciários para a remoção de nutrientes, até englobar todas as operações do tratamento, ou ir além e englobar o sistema de gestão de água pluvial ou de água urbana. Os processos principais de uma ETE, geralmente considerados dentro da fronteira dos sistemas estão apresentados na Figura 10. Na Tabela 3, são apresentados os processos englobados por cada um dos 26 artigos avaliados, nesta pode ser percebido um domínio da avaliação do sistema de tratamento de esgoto sanitário, com ou sem terciário, como um todo.

**Figura 10** - Processos principais de uma ETE.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

**Tabela 2** - Funções dos processos avaliados, Unidades Funcionais e identificação dos artigos em que foram utilizadas.

Função do processo avaliado	Unidades Funcionais	Trabalho
Remoção de poluentes (matéria orgânica e nutrientes)	Metro cúbico e seus múltiplos	Flores-Alsina et al. (2010) Foley et al. (2010) Højbye et al. (2008) Köhler et al. (2012) Muñoz et al. (2008) Niero et al. (2014) Pasqualino et al. (2009) Pasqualino et al. (2011) Pant et al. (2011) Rodriguez-Garcia et al. (2011) Schaubroeck et al. (2015)
	Remoção de potencial eutrofizante (quilograma de potencial eutrofizante removido - kg PO <sub>4</sub> eq.)	Lorenzo-Toja et al. (2015) Rodriguez-Garcia et al. (2011) Schaubroeck et al. (2015)
	Equivalente populacional	Gallego et al. (2008) Hospido et al. (2008)
Fonte de lodo, material substituto na fabricação de diversos materiais (fertilizantes minerais, aditivos minerais para a fabricação de cimentos)	Peso seco - toneladas	Liu et al. (2013) Murray et al. (2008) Nakakubo et al. (2012) Uggetti et al. (2011) Xu et al. (2014)
Substituir fonte de água	Metro cúbico de água e seus múltiplos	Amores et al. (2013) Meneses et al. (2010) Muñoz et al. (2009)
Gerar energia	Mega Joule e seus múltiplos	Fortier et al. (2014) Pant et al. (2011)
Tratamento de água pluvial	Área de drenagem (m <sup>2</sup> or hectare)	De Souza et al. (2012) Wang et al. (2013)

Fonte: Própria autora.

Na Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) são listados e quantificados os consumos, as emissões geradas e os produtos (ABNT, 2009b, 2009a). Assim, em aplicações de ACVs em ETEs, as características químicas do esgoto sanitário, bruto e tratado, e do lodo gerado e as quantidades de materiais e de energia consumidas (elétrica e combustível para transporte dos materiais para o processo e para a destinação do lodo gerado) são dados comumente quantificados. A utilização de dados primários, obtidos em campo (ETEs ou grupo de ETEs) utilizando entrevista e relatórios, para a caracterização das frações líquidas, quantificação do lodo e levantamento dos consumos foi comumente adotada (AMORES et al., 2013; FORTIER et al., 2014; GALLEGO et al., 2008; HOSPIDO; MOREIRA; FEIJOO, 2008; KÖHLER et al., 2012; LORENZO-TOJA et al., 2015; MUÑOZ et al., 2008; NIERO et al., 2014; PASQUALINO; MENESES; CASTELLS, 2011; PASQUALINO et al., 2009; RODRIGUEZ-GARCIA et al., 2011; SCHAUBROECK et al., 2015; UGGETTI et al., 2011; XU; CHEN; HONG, 2014). A mistura de dados primários e secundários também foi detectada, com a utilização de dados primários para inventariar dados de tratamentos em operação e dados secundários (dados científicos, relatórios setoriais e literatura técnica) para alternativas ainda em fase de estudo (sem escala real) (MENESES; PASQUALINO; CASTELLS, 2010). Assim como a obtenção de dados secundários por meio do simulador de processos *BioWin* para caracterização das entradas e saída da operação (emissões atmosféricas, caracterização do esgoto sanitário bruto e tratado) (FOLEY et al., 2010).

**Tabela 3** – Processos considerados na ACV e identificação dos artigos em que foram adotados.

Processos	Artigos
Tratamento completo de esgoto sanitário	Flores-alsina et al. (2010) Foley et al. (2010); Gallego et al. (2008); Hospido et al. (2008); Lorenzo-Toja et al. (2015); Muñoz et al. (2008); Niero et al. (2014); Pant et al. (2011); Pasqualino et al. (2009); Pasqualino et al. (2011); Rodríguez-García et al. (2011); Schaubroeck et al. (2015); Xu et al. (2014).
Tratamento terciário	Højbye et al. (2008); Köhler et al. (2012); Meneses; Pasqualino; Castells (2010); Munõz et al. (2009).
Tratamento do lodo e/ou destinação/reuso	Liu et al. (2013); Murray; Horvath; Nelson (2008); Nakakubo et al. (2012); Uggetti et al. (2011);
Água pluvial	De Sousa et al. (2012); Wang et al. (2013).
Recuperação e reuso do esgoto sanitário	Fortier et al. (2014); Handler et al. (2014)
Ciclo urbano da água	Amores et al. (2013)

Fonte: Própria autora.

Uma exclusão frequente, é das emissões atmosféricas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e do metano ( $\text{CH}_4$ ) geradas no processo produtivo a partir da oxidação de compostos orgânicos biogênicos conforme recomendação do IPCC (2006). Assim, nos inventários, não são desconsideradas as emissões provenientes da produção e consumo de energia, de combustível e de materiais ou na destinação dos resíduos. Estes dados geralmente são obtidos de forma secundária a partir do uso de banco de dados como o *Ecoinvent*<sup>®</sup>. O *Ecoinvent*<sup>®</sup> é a base de dados mais frequentemente citada para a obtenção de dados secundários, entretanto *SIMAPRO*, *BioWin*, *CMU EIO*, *IDEMAT*, *European Life Cycle Reference Database* (ELCD), *EIO-LCA*, *US Input Output* e *US LCI* também foram adotados.

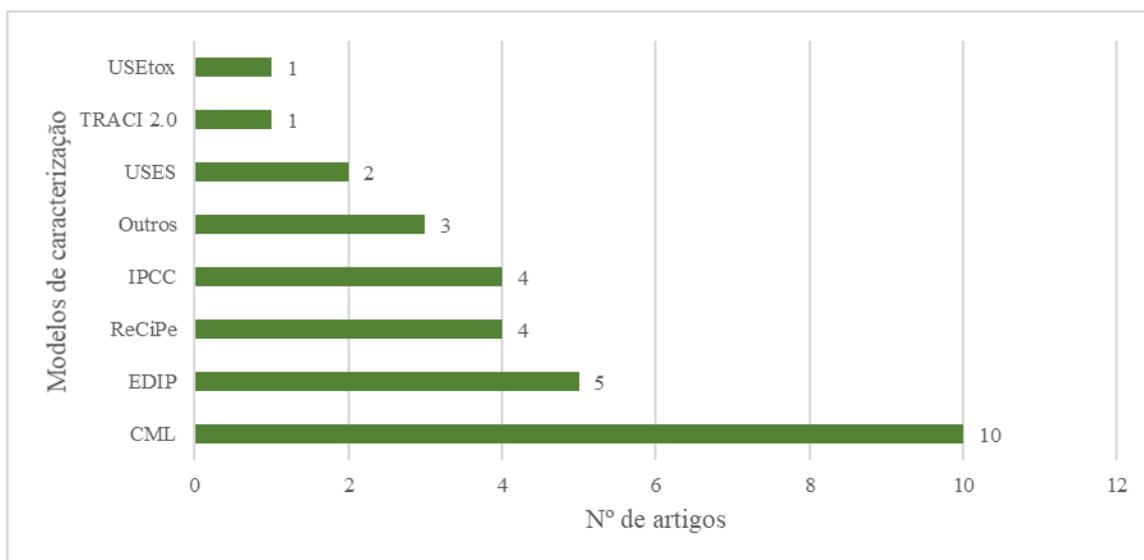
Na fase de Inventário, pode ser inicializada a Regionalização pelo uso de dados primários de ETEs, de características locais do esgoto sanitário e do tratamento, mas também pelo uso de dados secundários para levantamento das entradas e saída na

produção dos materiais e energias consumidos e dos materiais substituídos. Realizada pela utilização de bancos de dados locais ou da opção de seleção de local nas ferramentas globais, *Ecoinvent*<sup>®</sup> e o *SIMAPRO*. Por exemplo, Foley et al. (2010) consideraram dados da Austrália, Murray, Horvath, Nelson (2008) utilizaram dados Chineses, sempre que disponível, enquanto Foley et al. (2010), Gallego et al. (2008), Meneses, Pasqualino, Castells (2010), Mo, Zhang (2013), Muñoz et al. (2008), Murray, Horvath, Nelson (2008), Pant et al. (2011), Pasqualino et al. (2009) Rodriguez-Garcia et al. (2011) consideraram dados da Espanha.

Quando se trata de Regionalização, o trabalho de Gallego et al. (2008) se destaca entre o grupo avaliado, pois apesar de não promover ou defender a Regionalização, talvez pela época em que foi escrito este ainda não ser um ponto de preocupação, exemplificou bem as diferenças que podem surgir ao se considerar dados de diferentes estações e locais de instalação, principalmente quando se considera diferentes matrizes elétricas. Neste trabalho, ETEs com o mesmo processo adotado, Lodos Ativados com aeração prolongada, apresentaram diferentes categorias de impactos com maiores impactos normalizados de acordo com a planta avaliada. Foram consideradas as matrizes energéticas de 4 diferentes países Europeus, assim, as contribuições das categorias de impacto “Depleção Abiótica”, “Aquecimento Global” e “Oxidação Fotoquímica” variaram em até 10 vezes a partir do uso destas 4 matrizes elétricas diferentes.

Na etapa de Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV), o método de caracterização mais utilizado é o *CML 2000*, adotado em 10 dos 30 artigos, seguido pelo *EDIP*, 5 artigos, *ReCiPe* e *IPCC*, que foram adotados em 4 trabalhos cada. *CML 2000*, *EDIP* e *ReCiPe* têm abrangência global, mas com a utilização de fatores de impacto da Europa ocidental, local da maioria das ETEs estudadas (COMMISSION; JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010). Outros métodos utilizados podem ser observados na Figura 11. Alguns trabalham adotam mais de um método com a intenção de comparar os resultados (MUÑOZ et al., 2008; XU; CHEN; HONG, 2014) e outros visando resultados mais completos e precisos (SCHAUBROECK et al., 2015).

Avaliando os métodos mais utilizados do ponto de vista da Regionalização, podemos concluir que a Regionalização da AICV domina em um cenário Europeu. Visto que muitas das ETEs avaliadas estavam localizadas na Europa, assim como os fatores de impacto adotados pelos métodos de quantificação.

**Figura 11** - Métodos de Caracterização de impactos utilizados.

Fonte: Própria autora.

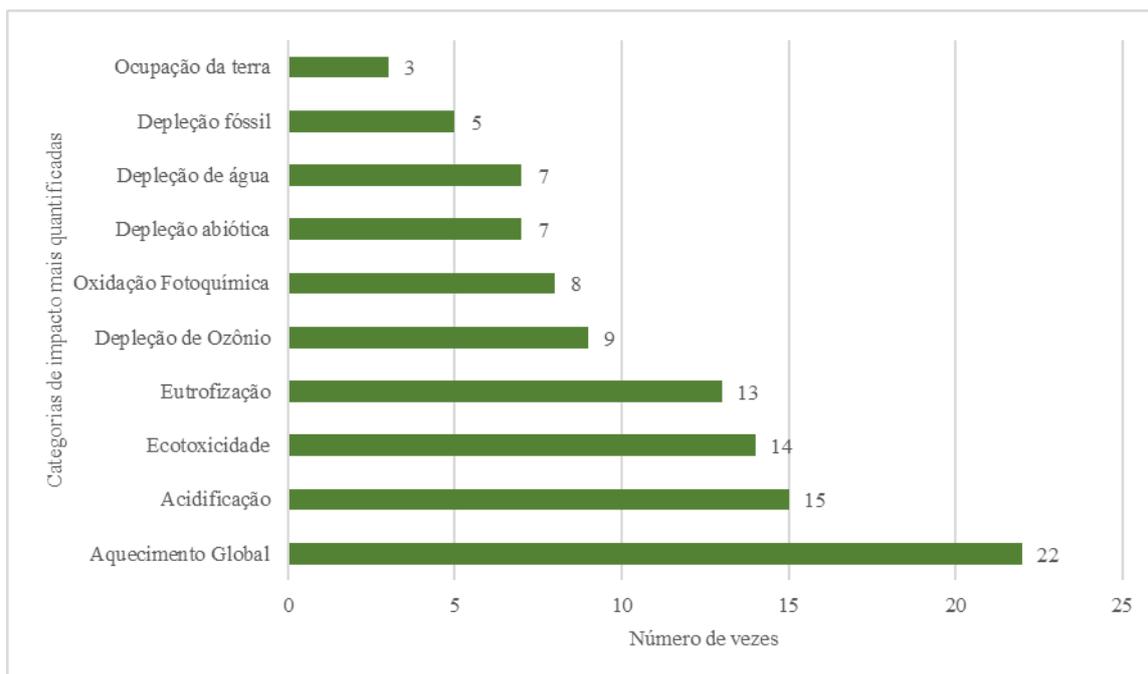
Dentre as categorias de impactos quantificadas, aquecimento global (GHG) e suas variações (mudança climática, por exemplo), têm sido a mais frequentemente quantificada em ETEs, a diferença em relação as outras categorias que aparecem próximas nas primeiras posição, é que alguns trabalhos apenas quantificaram o GHG na Avaliação de Impactos (DE SOUSA; MONTALTO; SPATARI, 2012; FORTIER et al., 2014; LIU et al., 2013; MURRAY; HORVATH; NELSON, 2008; NAKAKUBO; TOKAI; OHNO, 2012). Acidificação, toxicidade e eutrofização são as categorias mais avaliadas após GHG devido à proximidade na cadeia de causa e efeito com as emissões das ETEs.

É importante ressaltar que a etapa de AICV, que não é obrigatória de acordo com as normas ABNT 14040 e 14044 (2009a,b) não foi executada apenas por (Foley et al. (2010), o que corresponde a 4% da amostra. Na revisão de Corominas et al. (2013), 18% dos artigos analisados não tinham realizado esta etapa. Apesar da diferença de amostragem, já que o artigo de Corominas et al. (2013) considerou todos os artigos de LCA em ETEs publicados até a amostragem, excluindo os que tratavam exclusivamente do gerenciamento do lodo, pode ter ocorrido uma evolução com a realização de ACVs mais completas no intervalo de tempo entre estes 2 levantamentos.

A fase de interpretação da ACV, realizada juntamente com as outras etapas, garante a análise crítica frequente e reiterada do escopo, a qualidade dos dados para atendimento ao objetivo definido e o entendimento dos impactos caracterizados (ABNT,

2009). Entretanto, dentre os artigos analisados, Nakakubo, Tokai, Ohno (2012) se destaca por tornar clara as suposições feitas para o transporte, incluindo-as como material suplementar, assim como Fortier et al. (2014) que dedicou uma subseção as limitações do estudo.

**Figura 12** - Categorias de impacto mais quantificadas e número de vezes em que foram adotadas.



Fonte: Própria autora.

Na apresentação dos resultados da ACV, a apresentação por cenários é a mais frequentemente utilizada, podendo os cenários em análises ser diferentes ETEs, tecnologias, alternativas de reuso do esgoto sanitário ou do lodo, ou etapas do tratamento (FOLEY et al., 2010; FORTIER et al., 2014; GALLEG0 et al., 2008; HANDLER et al., 2014; HØIBYE et al., 2008; KÖHLER et al., 2012; LIU et al., 2013; LORENZO-TOJA et al., 2015; MENESES; PASQUALINO; CASTELLS, 2010; MUÑOZ et al., 2009, 2008; MURRAY; HORVATH; NELSON, 2008; NAKAKUBO; TOKAI; OHNO, 2012; NIERO et al., 2014; PANT et al., 2011; RODRIGUEZ-GARCIA et al., 2011; SCHAUBROECK et al., 2015; UGGETTI et al., 2011; WANG; ECKELMAN; ZIMMERMAN, 2013).

Essas observações feitas a partir desta análise bibliométrica foram consideradas quando da Definição do Objetivo e Escopo da ACV deste trabalho.

## 5. MATERIAL E MÉTODO

### 5.1. Definição de objetivo e escopo da ACV

Antes de estabelecer o Objetivo e Escopo da Avaliação do Ciclo de Vida serão apresentadas algumas delimitações e justificativas desta.

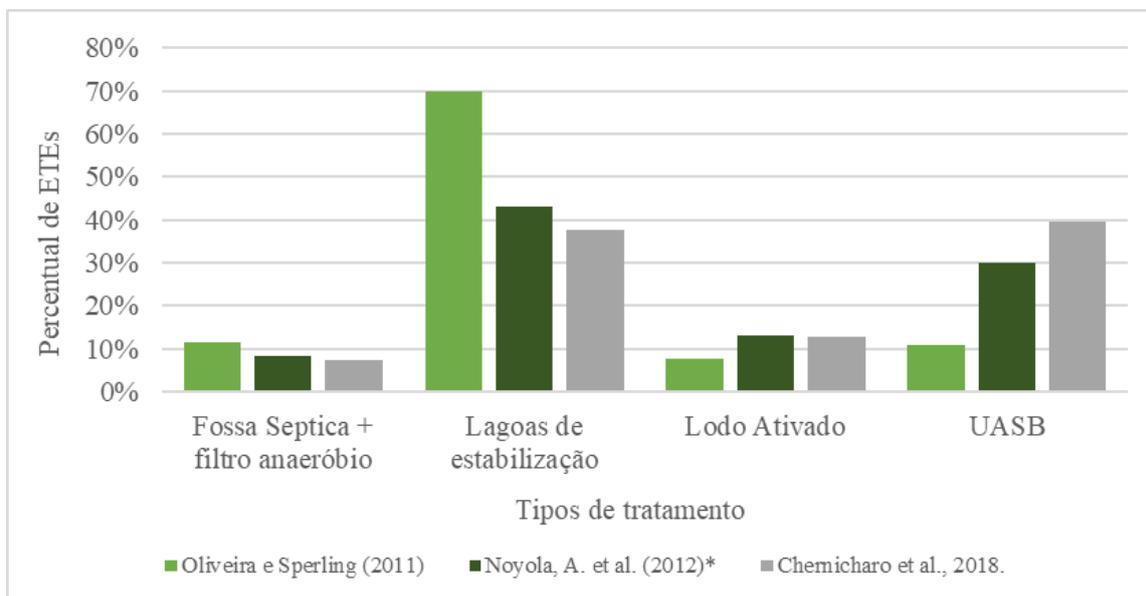
#### 5.1.1. Definição das ETEs avaliadas

As três configurações de ETEs mais utilizadas no Brasil, em número de ETEs implantadas, foram obtidas a partir da pesquisa e avaliação de trabalhos científicos sobre tratamento de esgoto sanitário no Brasil, visto que não havia um levantamento nacional atualizado do tipo de ETEs em operação no Brasil e esta pergunta não constava do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017 feito pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (SNIS, 2019). Assim, a definição das tipologias de ETEs mais utilizadas no Brasil foi feita a partir dos dados extraídos dos trabalhos de Chernicharo et al. (2018), Noyola et al. (2012) e de Oliveira, von Sperling (2011).

Apesar das diferenças em área geográfica e no número de amostras destes estudos, o primeiro abrangendo 1667 ETEs das regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil, o segundo com 702 ETEs de todo o Brasil e o terceiro com 166 ETEs dos estados de São Paulo e Minas Gerais, estes trabalhos apresentam os mesmos sistemas como sendo os mais utilizados no Brasil: Lagoas de Estabilização, Reator UASB e Lodos Ativados, como pode ser observado na Figura 13. De acordo com estes 3 artigos, estas tipologias juntas respondem entre 86% e 90% das ETEs instaladas no Brasil, o que permite uma boa amostragem para este trabalho.

É válido registrar que no trabalho de Noyola et al. (2012), as fossas sépticas foram consideradas pré-tratamentos e assim, não foram incluídas na contagem dos tipos de tratamento. De acordo com o SNIS (2021), as fossas são consideradas soluções alternativas, sendo excluídas dos sistemas públicos de tratamento de esgoto sanitários. Assim, as fossas sépticas foram excluídas deste estudo.

**Figura 13** - Sistemas de tratamento de esgoto sanitários mais adotados no Brasil de acordo com revisão bibliográfica.



Fonte: Própria autora.

Os detalhes dos estágios a serem estudados são discutidos nos itens 5.1.1.1, 5.1.1.2 e 5.1.1.3.

#### 5.1.1.1. Lagoas de Estabilização

Lagoas de Estabilização é um termo genérico que engloba diferentes tipos de lagoas, como discutido na revisão bibliográfica. A definição de que tipos de lagoas seriam estudadas foi feita a partir do levantamento de ETEs brasileiras em operação (não publicado)<sup>1</sup>. Nesta relação, foi encontrado que a combinação que mais se repete no Brasil (7 em 28) é de lagoa anaeróbia seguida de lagoa de facultativa. A lagoa de maturação foi adotada para remoção/inativação de organismos patogênicos para que esta fosse avaliada em comparação a dosagem de hipoclorito de sódio adotada para os outros sistemas.

<sup>1</sup> Este questionário foi aplicado pelos pesquisadores do grupo do Dr. Adalberto Noyola da *Universidad Nacional Autónoma de México* (UNAM) e apesar de não publicado, os dados foram usados e citados em outros trabalhos deste grupo (HERNANDEZ-PADILLA et al., 2017; NOYOLA et al., 2012). O acesso aos dados deste questionário foi possível devido a parceria estabelecida com pesquisadores da UNAM e da *École Polytechnique de Montréal*.

### 5.1.1.2. Reator UASB seguido de Lodos Ativados

O Lodos Ativados como pós-tratamento do Reator UASB é tão implantado quanto o Filtro Aeróbio, também de acordo com o questionário realizado pelos pesquisadores da Universidade Autônoma do México. Decidiu-se adotar o Lodos Ativados como pós-tratamento, mesmo com a maior complexidade tecnológica deste frente ao filtro aeróbio, visto que este é proposto como um dos tipos de tratamento a ser avaliado, por ser o 3<sup>a</sup> mais adotado no BR. Assim, além de compararmos os 3 tratamentos, temos a vantagem de avaliar a adoção do Reator UASB, como tratamento principal na remoção de matéria orgânica carbonácea, para mitigar o consumo de energia e maior produção de lodo relacionados ao uso do Lodos Ativados.

### 5.1.1.3. Lodos Ativados

Lodos Ativados com aeração prolongada composto de tanque de aeração e sedimentador secundário.

Desta maneira, os sistemas de tratamento de esgoto sanitário objetos de estudo deste trabalho são: 1- Lagoas de Estabilização (LE): Lagoa anaeróbia seguida de lagoas facultativa e de maturação; 2- Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA): Reator UASB seguido de Lodos Ativados; e 3- Lodos Ativados (LA): Lodos Ativados. Para todos os 3 sistemas foram considerados o mesmo pré-tratamento (grade, medidor *Parshall* e caixa de areia). Também foram consideradas duas formas de remoção/inativação de organismos patogênicos: a) Lagoa de maturação para o sistema Lagoas de Estabilização, b) câmara de contato para aplicação de hipoclorito de sódio para os sistemas Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados. Leito de secagem foi considerado apenas para desidratação do lodo gerado pelos sistemas Reator UASB seguido de Lodos Ativados e Lodos Ativados. Os estágios para cada tipo de tratamento são resumidos na Quadro 1.

**Quadro 1** - Detalhes dos estágios constituintes de cada tratamento a ser estudado.

<b>Lagoas de Estabilização</b>	<b>Reator UASB + Lodos Ativados</b>	<b>Lodos Ativados</b>
Pré-tratamento	Pré-tratamento	Pré-tratamento
Lagoa anaeróbia	Reator UASB	Tanque de aeração
Lagoa facultativa	Tanque de aeração	Sedimentador secundário
Lagoa de maturação	Sedimentador secundário	Câmara de contato
	Câmara de contato	Leito de secagem de lodo
	Leito de secagem de lodo	

Fonte: Própria autora.

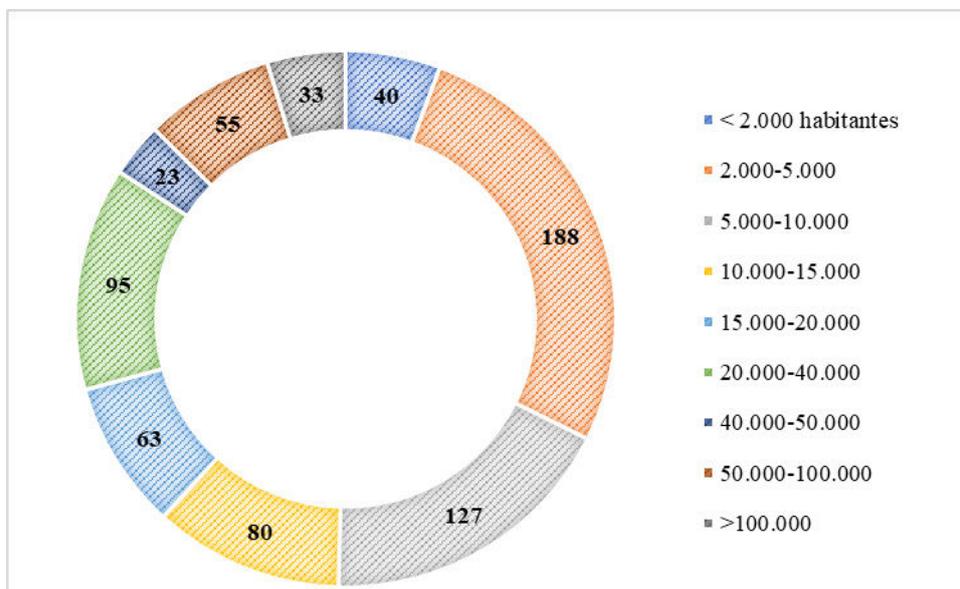
### 5.1.2. Determinação da população a ser atendida pelas ETEs

Devido a grande diferença de dimensão entre os tipos de tratamento a serem avaliadas neste trabalho, a etapa de construção deve ser considerada como um das etapas do ciclo de vida das ETEs. Assim, foi necessário definir uma população a ser atendida e dimensionar as 3 ETEs de acordo esta população.

As ETEs avaliadas foram dimensionadas para atender uma população de 9.767 habitantes, conforme será apresentado no item 5.2.2.4. Inventário de Construção. Este número foi obtido a partir do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), dados de 2017. Esta população representa a mediana de população do grupo de municípios que informaram tratar menos de 10% do esgoto sanitário gerado.

A Mediana foi a ferramenta estatística escolhida visto que a média não é a ferramenta correta para descrever distribuições fortemente assimétricas, sendo a mediana mais eficiente para tal tipo de distribuição (RODRIGUES, 2014). A distribuição da população dos municípios Brasileiros que tratam menos de 10% do esgoto sanitário está apresentada na Figura 14.

**Figura 14** - Número de municípios que tratam menos de 10 % do esgoto por faixas de população.



Fonte: Própria autora

Para obtenção da população, no site do SNIS (<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2017>), foi feito o download das 3 tabelas listadas pelo nome a seguir. Essas apresentam dados do diagnóstico de água e esgoto sanitário para o ano de 2017, última publicação na data de consulta (setembro/2019):

- Tabelas Completas de informações e indicadores dos prestadores de serviços de saneamento de abrangência Local – Direito Público (LPu).
- Tabelas Completas de informações e indicadores dos prestadores de serviços de saneamento de abrangência Local – Empresa Privada (LEP).
- Tabelas Completas de informações e indicadores dos prestadores de serviços de saneamento de abrangência Local – Direito Privado com Administração Pública (LPr).

As informações destas 3 Tabelas foram consolidadas em uma Tabela única, a partir dos dados destas 3 tabelas de indicadores. Foi criada uma coluna adicional na qual, utilizando os dados das colunas AG010 (volumes de água - consumido) e ES006 (volumes de esgoto – tratado), foi calculado o percentual de tratamento de cada município (ES006/AG010) e filtrado com informações deste percentual menor ou igual a 10 %, foram obtidos 704 municípios.

Primeiramente, foi obtido 26.990 habitantes como a média populacional destes municípios, coluna GE12a (População residente total, segundo o IBGE). Entretanto como apenas 10 municípios têm mais de 200 mil habitantes, esse número não ficou representativo do grupo. Assim, mudou-se para a utilização da mediana, 9.767 habitantes.

### 5.1.3. Objetivo e o Escopo da Avaliação da ACV

Os elementos da etapa de Definição de Objetivo e do Escopo da Avaliação do Ciclo de Vida que foram utilizados para a realização da ACV são apresentados no Quadro 2. As definições adotadas derivam da revisão bibliográfica realizada.

Foram estabelecidos todos os elementos necessários para a definição de metas e escopo para que a ACV abranja as etapas de construção, de operação e de destinação do lodo gerado. Foram seguidas as recomendações da norma ABNT 14044 e da publicação *Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards* (ABNT, 2009b, 2009a; GUINÉE et al., 2001a, 2001b).

Foi estabelecido que a unidade funcional a ser utilizada seria metros cúbicos e que a fronteira da ACV deveria abranger a construção e a operação do processo de tratamento de esgotos e de tratamento e a destinação do lodo gerado, visto que os fluxos destes processos podem variar de acordo com a forma de tratamento adotada. A etapa de encerramento da ETE (desmobilização e/ou demolição) não foi incluída, devido à falta de dados e porque raramente são consideradas com o pressuposto de que teriam poucos impactos perto das outras fases (COROMINAS et al., 2013; GARFÍ; FLORES; FERRER, 2017; LOPES et al., 2020).

**Quadro 2** - Definição dos Elementos de Objetivo e Escopo a serem adotados na realização da ACV.

Elementos		
Objetivo	Aplicação da ACV	Apontar qual o tipo de tratamento de esgoto sanitário apresenta o melhor perfil ambiental dentre os 3 sistemas de tratamento de esgoto sanitário mais comuns no Brasil: (1) Lagoas de Estabilização, (2) Reator UASB + Lodos Ativados: Reator UASB seguido de Lodos Ativados e (3) Lodos Ativados: Lodos Ativados, para tratar o esgoto sanitário de um município de 9. 767 habitantes
	Razões para a execução do estudo	Fornecer dados sobre os danos ambientais dos sistemas que possam vir a ser considerados na escolha de sistemas de tratamento de esgoto sanitário a ser implantado pelos municípios
	Público-alvo do estudo	Tomadores de decisão
	Os resultados serão utilizados em avaliações comparativas	Sim
Escopo	Produto a ser estudado	Sistemas de tratamento de esgoto sanitário por Lagoas de Estabilização, Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados
	Funções do produto e escolha da ser estudada	Reduzir a carga poluidora do esgoto sanitário antes do lançamento em corpos hídricos
	Unidade Funcional	1 metro cúbico de esgoto sanitário por uma vida útil de 20 anos
	Fronteiras do sistema	Esgoto sanitário recebido e o lançamento, incluindo a fabricação e transporte dos materiais de construção e consumíveis (hipoclorito de sódio, cal e energia elétrica) e a destinação do lodo gerado.  A fase de construção foi considerada devido a grande diferença tecnológica dos 3 sistemas (Lagoas de Estabilização, Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados), as diferentes demandas e a contribuição para os impactos ambientais verificada em fase de teste.  A desativação das Estações não foi incluída para uniformizar com a maioria dos trabalhos que não inclui esta fase.  As fronteiras do sistema podem ser observadas na Figura 15.
	Procedimentos de alocação (se necessário)	Não aplicável.
	Categorias de impacto selecionadas	Áreas de Proteção: Saúde Humana e Qualidade dos Ecossistemas.  Saúde humana: Mudança climática de longo termo e de curto termo, toxicidade humana cancerígena de longo termo e de curto termo, toxicidade humana não cancerígena de longo termo e de curto termo, radiação ionizante, depleção de camada de ozônio, formação de material particulado, formação de oxidante fotoquímico e disponibilidade de água.  Qualidade dos Ecossistemas: Mudança climática de longo e de curto termo, acidificação de água doce, ecotoxicidade de água doce de longo termo e de curto termo, eutrofização de água doce, radiação ionizante, ocupação da terra (biodiversidade), transformação da terra (biodiversidade), acidificação marinha de longo prazo e de curto prazo, eutrofização marinha, acidificação terrestre, água termicamente poluída, disponibilidade de água (água doce), disponibilidade de água (terrestre).

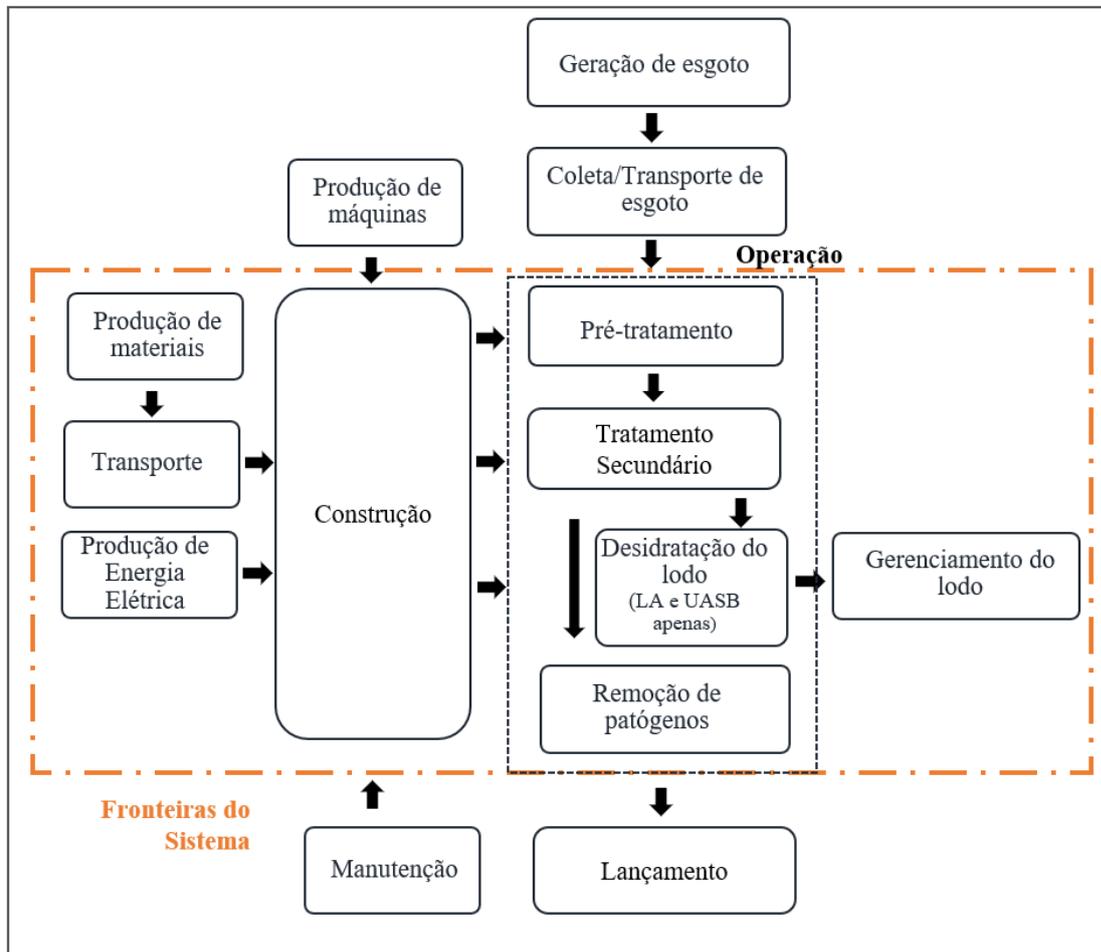
*Continua*

Escopo (continuação)	Metodologia para avaliação de impactos	<i>IMPACT World+</i> versões “ <i>Continental Latin America_Damage 1.431</i> ” e “ <i>Continental Latin America_Midpoint 1.251</i> ” no programa <i>Open LCA 1.10.3</i>
	Metodologia para interpretação	<p>Por etapas do ciclo de vida: construção, operação, destinação do lodo e lançamento do esgoto sanitário tratado.</p> <p>Para a construção dos estágios: pré-tratamento, tratamento secundário, pós-tratamento (remoção/inativação de organismos patogênicos e desidratação do lodo para as ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados)</p> <p>Análises de Sensibilidade para algumas das maiores contribuições para os impactos ambientais: destino do lodo (uso como biofertilizante), provedor de Energia Elétrica e consumo de energia elétrica por volume de efluente tratado. Também foi feita análise de sensibilidade para o método escolhido, usando o método <i>ReCiPe 2016</i>.</p>
	Requisitos de dados	<p>Dados primários:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumos de energia elétrica e de hipoclorito de sódio consumidos na etapa de Operação</li> <li>- Características do esgoto sanitário bruto e do esgoto lançado</li> <li>- Quantidade de resíduos sólidos gerados (lodo), exceto para as Lagoas de Estabilização</li> <li>- Materiais e combustíveis usados na construção das ETEs</li> </ul>
		<p>Dados secundários regionalizados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Emissões atmosféricas dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário e tratamento do lodo</li> <li>- Consumos para o tratamento do lodo</li> <li>- Produção e distribuição de Energia Elétrica</li> </ul>
		<p>Dados secundários não regionalizados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção e transporte de todos os materiais e combustíveis</li> <li>- Base de dados Ecoinvent</li> </ul>
	Pressupostos	O tratamento de esgoto sanitário por cada tipo de sistema é uniforme em suas características no Brasil
Limitações	<p>As ETEs Lagoas de Estabilização e Reator UASB são mais comuns em países de clima quente.</p> <p>A manutenção e a desativação das ETEs foram excluídas.</p> <p>O biogás gerado, rico em metano, não é usado para a produção de energia.</p> <p>O reuso ou a destinação da terra retirada durante a construção das lagoas não foram consideradas.</p> <p>As concentrações de metais no lodo e no esgoto sanitário (bruto e tratado) foram consideradas as mesmas para os 3 sistemas por serem estas consequências da qualidade do esgoto sanitário recebido para tratamento.</p> <p>Matriz elétrica brasileira diferenciada com alta contribuição de fontes renováveis.</p> <p>Processos globais para a produção de materiais de construção, combustíveis e químicos (cal, hipoclorito de sódio e fertilizante).</p> <p>Nenhum micro poluentes orgânico foi considerado no lançamento do esgoto tratado.</p> <p>A quantificação dos ganhos para a saúde humana com a remoção de micro-organismos patogênicos não é possível.</p>	

Escopo (continuação)	Requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados	Obtenção de dados diretamente das empresas de saneamento. Utilização de dados científicos de pesquisas realizadas no Brasil. Sempre que forem encontrados mais de um dado para a mesma variável, foi utilizado a média dos dados.
	Tipo de análise crítica (se aplicável)	Não
	Tipo e formato do relatório requerido	Relatório em formato de artigo científico

Fonte: Própria autora

**Figura 15** – Fronteiras dos sistemas aplicáveis as 3 estações de tratamento de esgoto



Fonte: Própria autora.

## 5.2. Inventário do Ciclo de Vida

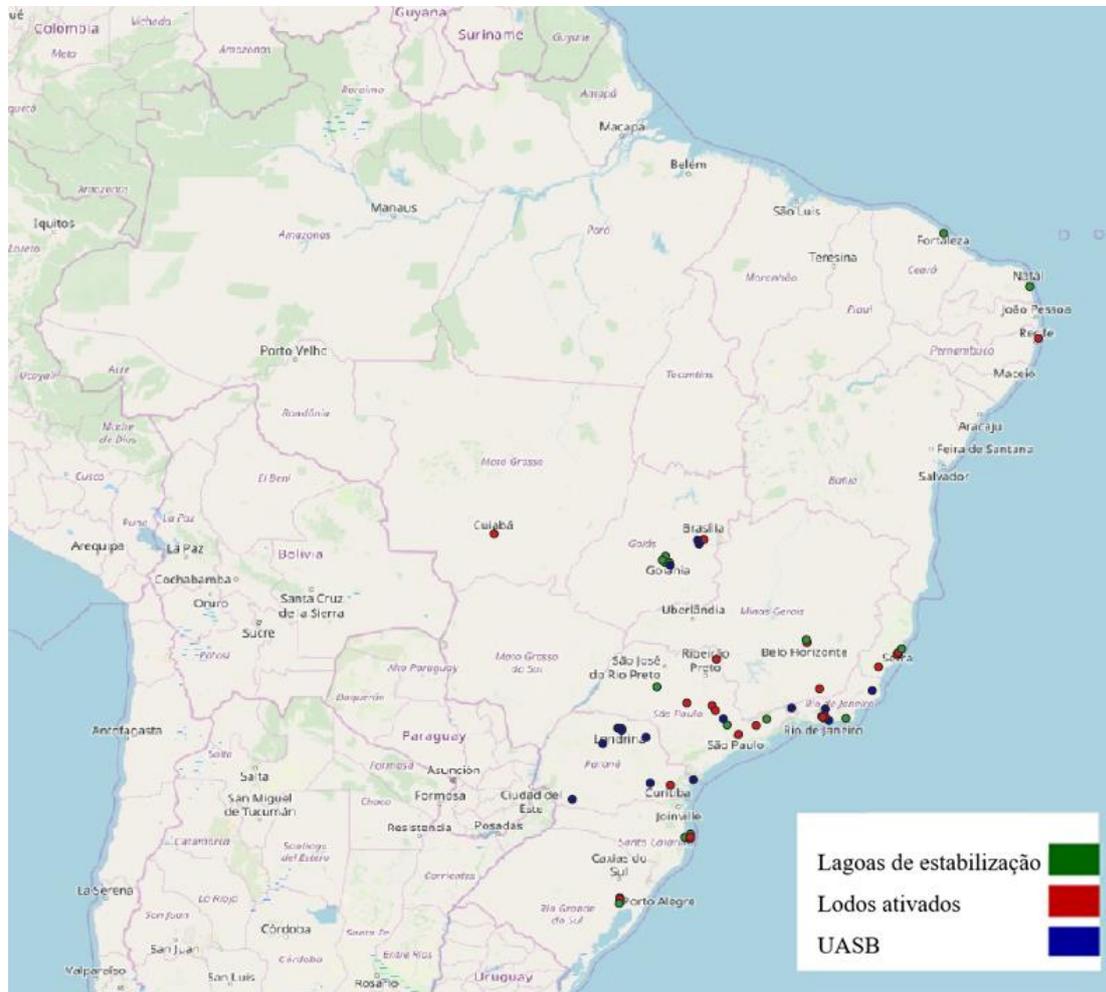
Foram obtidos dados primários sob os tipos de tratamento, a operação das ETEs (vazões tratadas, características químicas dos efluentes sanitários, geração de lodo etc.) e destinação do lodo gerado diretamente com as companhias de tratamento de esgoto sanitário do Brasil pela aplicação de um questionário (não publicado) pelos do grupo do Dr. Adalberto Noyola da *Universidad Nacional Autónoma de México* (UNAM).

Grande parte das ETEs Brasileiras levantadas pelo grupo do Dr. Adalberto Noyola estão concentradas na região sudeste e sul do país, mas com algumas ETEs nas demais regiões, exceto na região norte. Essa distribuição, que pode ser observada na Figura 16 feita utilizando o programa QGIS, representa a diversidade dos dados obtidos a partir desse questionário, visto que os dados extraídos (parâmetros de caracterização do esgoto tratado, os consumos de eletricidade e químicos, e a geração de lodo) foram adotados como padrão dos tipos de tratamento no Brasil nesse trabalho.

Em relação a quantidade de ETEs por tipo de tratamento, contabilizamos:

- 15 Lagoas de Estabilização;
- 18 Reatores UASB;
- 24 Lodos Ativados.

**Figura 16** - Sistemas de tratamento de esgoto sanitário por Lagoas de Estabilização, Reator UASB e Lodos Ativados em operação no Brasil levantados pelos pesquisadores da UNAM.



Fonte: Própria autora

Como nem todas as ETEs possuem dados completos, foram utilizados neste trabalho apenas as ETEs que apresentavam os dados de capacidade e os resultados de Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) do esgoto tratado. Assim chegou se a amostragem final de 24 ETEs, sendo 7 Lagoas de Estabilização (Anaeróbia/Facultativa/Maturação), 7 Reatores UASB seguidos de Lodos Ativados (UASB/Lodos Ativados) e 10 Lodos Ativados, como apresentado na Tabela 5. A esta amostra foram somadas as ETEs de Lins/SP (Lagoas de Estabilização) e a ETE Central de Jacaré/SP (UASB/Lodos Ativados) das quais os dados foram obtidos diretamente pela autora, também pela aplicação de um questionário.

**Tabela 4** - Sistemas de tratamento específicos e quantidade de amostras

Nome	Detalhe do sistema	Quantidade
Lagoas de Estabilização	Lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa e de lagoa de maturação	7
Reator UASB + Lodos Ativados	Reator UASB seguido de Lodos Ativados	7
Lodos Ativados	Lodos Ativados	10

Fonte: Própria autora.

Além da capacidade de tratamento em vazão de tratamento e da DBO do esgoto tratado, este levantamento também nos forneceu: concentração de nutrientes (fósforo e nitrogênio total) no esgoto sanitário bruto e tratado; consumo de energia elétrica e de químicos (hipoclorito de sódio, polieletrólitos e cal); quantidade gerada de lodo para os sistemas Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados. Já a quantidade de lodo gerado nas Lagoas de Estabilização foram obtidas na Andreoli, von Sperling, Fernandes (2007).

#### 5.2.1. Estudo de contribuição ao impacto e variabilidade dos dados

A fim de direcionar a obtenção de dados mais apurados foi realizada uma rodada de testes aplicando o *Impact World+*, sem Regionalização da avaliação dos impactos, para cada um dos 3 sistemas de tratamento do estudo, seguido de uma avaliação de Contribuição no Somatório de impactos versus a Variabilidade dos dados.

Para tal estudo, foram usados os dados obtidos do levantamento das ETEs com cálculo da média e desvio padrão (Dados ETEs) e completados com dados da literatura (Fonte identificada), conforme apresentado no Quadro 3. Os valores para a construção do sistema Reator UASB + Lodos Ativados foram estimados a partir da relação de dimensionamento do volume com o sistema de Lodos Ativados. A concentração de metais no lodo e no efluente foram considerados iguais aos do Lodos Ativados, visto que este é o tratamento complementar do Reator UASB e responde pela maior parte da produção de lodo. Da mesma maneira, as mesmas dosagens de polímero catiônico e de cal para o tratamento do lodo também foram adotadas para os dois sistemas. Estes dados foram inseridos em uma Avaliação do Ciclo de Vida de cada sistema, sempre que possível usando a opção “*market*” e associado preferencialmente ao local Brasil ou “resto do mundo” como provedor. As entradas de dados foram organizadas como subprocessos conforme a primeira coluna do Quadro 3.

Os resultados das ACVs obtidos por tipo de ETE foram organizados para identificar as 3 categorias de impactos com maior contribuição para as áreas de proteção ambiental qualidade dos ecossistemas e saúde humana. Dentro destas 3 categorias, foram identificadas as 3 maiores contribuições para cada uma das 2 áreas de proteção ambiental. Geralmente, estas entradas/saídas do inventário com maiores contribuições corresponderam a mais de 50% dos impactos estimados. Em seguida, estas maiores contribuições foram cruzadas com a variabilidade dos dados (desvio padrão dividido pela média). No caso de uma única fonte de dados, o valor 1 foi adotado para a variabilidade.

Os 3 maiores resultados de contribuição para impactos e variabilidade foram avaliados quanto a necessidade e a possibilidade de uma nova Regionalização do inventário, feita com a obtenção de dados por região do Brasil ou com uma busca adicional de dados.

**Quadro 3** – Fontes dos dados utilizados no estudo de Contribuição X Variabilidade

Etapa	Parâmetro	Lagoas de Estabilização	Reator UASB + Lodos Ativados	Lodos Ativados
Construção	Areia	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Construção	Diesel combustível	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Construção	Diesel máquina	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Construção	Energia elétrica	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Construção	Cimento Portland	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Construção	Aço	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Construção	Transporte	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Fim de vida	Pedregulhos	Estimado	Estimado	Estimado
Fim de vida	Sucata de aço	Estimado	Estimado	Estimado
Lodo	Geração de lodo	Andreoli, von Sperling, Fernandes (2007)	Dados ETES	Dados ETES
Lodo	Polímero Catiônico (Poliacrilamida)	-	Dados ETES	Dados ETES
Lodo	Arsênio	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Cadmio	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Cromo	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Cobre	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Ferro	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Mercúrio	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Manganês	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Chumbo	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Zinco	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Lodo	Cal	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Cobre	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Energia elétrica	Dados ETES	Dados ETES	Dados ETES
Operação	DBO	Dados ETES	Dados ETES	Dados ETES
Operação	NaClO ou Cal	Dados ETES	Dados ETES	Dados ETES

*Continua*

*Continuação*

Operação	Arsênio	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Etapa	Parâmetro	Lagoas de Estabilização	UASB+LA	Lodos Ativados
Operação	Cádmio	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Metano - CH <sub>4</sub>	Gutierrez (2014)	Gutierrez (2014)	Gutierrez (2014)
Operação	Cromo	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Ferro	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Mercúrio	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Manganês	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Óxido nítrico - N <sub>2</sub> O	Gutierrez (2014)	Gutierrez (2014)	Gutierrez (2014)
Operação	Chumbo	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)
Operação	Nitrogênio total	Dados ETEs	Dados ETES	Dados ETES
Operação	Fósforo total	Dados ETES	Dados ETES	Dados ETES
Operação	Zinco	Hernandez-Padilla et al. (2017)	Estimado	Hernandez-Padilla et al. (2017)

Fonte: Própria autora

## 5.2.2. Demais entradas e saídas do Inventário

### 5.2.2.1. Emissões atmosféricas do tratamento de esgoto sanitário

As mesmas quantidade de gases, óxido nitroso e metano, levantadas por (GUTIERREZ, 2014) para os 3 tratamentos foram utilizadas neste trabalho (Tabela 5). Entretanto para o sistema Reator UASB + Lodos Ativados, apenas as emissões fugitivas de metano (32,1 %) foram consideradas como emissões de metano, visto que o restante é queimado no *Flare* sendo emitido como dióxido de carbono, não considerado em nenhum dos sistemas por ser de origem biogênico (IPCC, 2006). As quantidades de óxido nitroso foram consideradas iguais nos dois sistemas que usam Lodos Ativados, visto que o Reator UASB não remove nitrogênio significativamente, deixando este encargo para o tratamento complementar, Lodos Ativados (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011).

**Tabela 5** – Emissões atmosféricas inventariadas por tipo de tratamento

Gás	unidade	Lagoas de Estabilização	Reator UASB + Lodos Ativados	Lodos Ativados
Metano – CH <sub>4</sub>	g.m <sup>-3</sup> esgoto sanitário	89,4	29,5	-
Óxido nitroso – N <sub>2</sub> O	g.m <sup>-3</sup> esgoto sanitário	-	1,20E-02	1,20E-02

Fonte: Gutierrez (2014)

### 5.2.2.2. Metais

A caracterização dos metais presentes no esgoto sanitário bruto e tratado foi pesquisada em artigos e livros de estudos de ETEs Brasileiras. A concentração destes metais no esgoto sanitário bruto geralmente é consequência de fatores ambientais (perda do solo e deposição atmosférica) e antropogênicos locais (destinação de resíduos sólidos, escoamento de águas de drenagem urbana, entre outros) (BERALDI et al., 2019). Assim, a concentração de metais no esgoto bruto e tratado e no lodo são consequências da qualidade do esgoto sanitário recebido nas estações (HOSPIDO; MOREIRA; FEIJOO, 2008). Ademais, como não foi encontrada uma quantidade significativa de dados por tipo de tratamento de ETEs em operação no Brasil, adicionado ao fato de os valores terem a mesma ordem de grandeza, foi adotada a média por parâmetro encontrado com valores iguais de concentração para os três sistemas de tratamento (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007; BRAGA et al., 2017; FERRAZ; POGGIANI, 2014; MOREIRA et al., 2020; NOGUEIRA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2007; PIPI et al., 2018; SOUZA; CANTERAS; MOREIRA, 2014; TONANI et al., 2011).

### 5.2.2.3. Emissões e consumos da destinação de lodo em aterro sanitário e reuso como biofertilizante

O inventário de emissões e de consumos na destinação do lodo foi baseado na tese de Gutierrez (2014), entretanto considerando a quantidade de lodo média gerada obtida no levantamento das ETEs, exceto para o sistema de Lagoas de Estabilização (Tabela 6). As principais considerações são apresentadas a seguir:

- A composição do lodo em base seca dos 3 sistemas foi considerada a mesma, sendo utilizada para o cálculo da produção de biogás (aterro) e para a quantidade de nutrientes substituídas (biofertilizante). Assim, como a caracterização do chorume produzido em aterro;
- Foi desconsiderada, para esta parte do inventário, a concentração que ocorre com a desidratação do lodo pelo uso do Leito de secagem para as ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados por falta de dados.

**Tabela 6** – Geração de lodo por sistema de tratamento e conteúdo de sólidos adotado com fonte destes dados

	Lagoas de Estabilização	Reator UASB + Lodos Ativados	Lodos Ativados
Geração média – m <sup>3</sup> de lodo/m <sup>3</sup> de esgoto sanitário	0,0032	0,0009	0,0049
Conteúdo de Sólidos (massa seca) após leito de secagem	Adotado 30% por ser proveniente de tratamento anaeróbio e aeróbio como o Reator UASB seguido de Lodos Ativados	30 %	27 %
	Andreoli, von Sperling, Fernandes (2007)		Média da revisão dos metais no lodo

Fonte: Própria autora

- Mesmas distâncias e capacidade de transporte para as duas alternativas de destinação (7,8 toneladas e 32,9 km). De acordo com o questionário, estes valores são a média de 33 dados de ETEs que enviam o lodo para destinação em aterro, visto que disponibilizávamos de apenas 3 amostras que destinam o lodo como reuso na agricultura;
- Para a aplicação do lodo como biofertilizante, atendendo a legislação Brasileira, adotou-se a higienização do lodo proveniente das ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados com 50% (p/p) de cal e a aplicação com trator

(ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007; BRASIL, 2006; NOGUEIRA et al., 2007);

- A composição do lodo em NPK (Tabela 7) foi retirada de Nascimento et al. (2020);

**Tabela 7** - Composição do fertilizante a ser substituído pelo lodo para cálculo da relação de quantidade a ser substituída.

Elemento	Sigla	Quantidade	Unidade
Nitrogênio	N	0,83	dag.kg <sup>-1</sup>
Fósforo	P	0,66	dag.kg <sup>-1</sup>
Potássio	K	0,53	dag.kg <sup>-1</sup>

Fonte: Nascimento et al. (2020)

A destinação em aterro leva à produção de chorume a ser tratado em Lagoas de Estabilização e à produção de biogás a ser queimado em *flare* (Tabelas 8 e 9, respectivamente). Apenas 50% do metano foi considerado como convertido à dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sendo desconsiderado como emissão por ser de origem biogênica.

**Tabela 8** - Composição do lixiviado produzido pelo aterramento de lodo após tratamento em lagoas.

Item	Quantidade	unidade
Volume	0,119	m <sup>3</sup> .ton de lodo <sup>-1</sup>
DBO	321	mg.L <sup>-1</sup>
Nitrogênio Amoniacal	170	mg.L <sup>-1</sup>
Nitrogênio Orgânico	13	mg.L <sup>-1</sup>

Fonte: Gutierrez (2014)

**Tabela 9** - Composição do biogás produzido pelo aterramento de lodo.

Gases	Quantidade	unidade
Metano - CH <sub>4</sub>	19,688	m <sup>3</sup> .ton de lodo <sup>-1</sup>
Nitrogênio - N <sub>2</sub>	0,715	m <sup>3</sup> .ton de lodo <sup>-1</sup>
Amônia- NH <sub>3</sub>	0,180	m <sup>3</sup> .ton de lodo <sup>-1</sup>
Monóxido de carbono - CO	0,036	m <sup>3</sup> .ton de lodo <sup>-1</sup>
Dióxido de enxofre - SO <sub>2</sub>	0,180	m <sup>3</sup> .ton de lodo <sup>-1</sup>

Fonte: Gutierrez (2014)

- Os consumos de combustíveis foram convertidos à unidade de transporte (tkm) para que mais emissões pudessem ser consideradas;

Os metais do lodo foram levantados em revisão bibliográfica de estudos de ETEs em operação no Brasil. Foram adotadas as mesmas concentrações em massa seca para cada um destes componentes no lodo oriundo das 3 ETEs (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2007; BRAGA et al., 2017; FERRAZ; POGGIANI, 2014; MOREIRA et al., 2020; SOUZA; CANTERAS; MOREIRA, 2014), mas as quantidades finais por volume de lodo são diferentes por conta do percentual de umidade.

#### 5.2.2.4. Inventário de construção das ETEs

Os 3 sistemas de tratamento de esgoto sanitário em estudo (Lagoas de Estabilização, Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados) foram dimensionados para atender a população de estudo, 9.767 habitantes, conforme discutido no item 5.1.2. Determinação da população a ser atendida pelas ETEs. Foram utilizados parâmetros e métodos sugeridos na coleção “*Biological Wastewater treatment Series*” de von Sperling e Chernicharo de 2007. Os parâmetros principais utilizados no dimensionamento das ETEs são apresentados na Tabela 10. Conforme detalhado no item 5.1.1. Definição das ETEs avaliadas: (i) para todas as 3 ETEs em estudo foram considerados o mesmo pré-tratamento; (ii) foram consideradas duas formas de remoção/inativação de organismos patogênicos: a) Lagoa de maturação para o sistema Lagoas de Estabilização, b) câmara de contato com aplicação de hipoclorito de sódio para os sistemas Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados; (iii) Leito de secagem foi considerado apenas para desidratação do lodo gerado para as ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados.

**Tabela 10** - Parâmetros usados no dimensionamento dos 3 tipos de ETEs

Etapa	Parâmetro	Valor	Unidade
Geral	População	9767	habitantes
	Vazão média	991,35	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>
	Vazão máxima	14,24	l.s <sup>-1</sup>
	DQO média	1062,6	mg.l <sup>-1</sup>
	DBO média	499,4	mg.l <sup>-1</sup>
	Temperatura do esgoto doméstico	19,9	° C
	Concentração de coliformes termotolerantes no esgoto doméstico	1,00E+09	UFC.100 ml
Lagoa anaeróbia	Taxa de aplicação volumétrica - Lv	0,14	kg DBO. m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup>
	Profundidade	4,25	m
	Relação Largura/comprimento - L/B	2,5	-
	Equação para estimar DBO após tratamento	2*T+20	%
	Equação para estimar Lv	0.02*T - 0.10	kg DBO. m <sup>-3</sup> .d <sup>-1</sup>
	Regime	Mistura completa	-
Lagoa facultativa	Taxa de aplicação superficial	167,3	kg DBO. ha <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
	Profundidade útil	1,5	m
	Coefficiente de remoção de DBO - K	0,3	d <sup>-1</sup>
	Regime	Mistura completa	-
	Equação para estimar DBO solúvel após tratamento	DBO/(1+ K*TDH)	mg DBO <sub>sol</sub> .L <sup>-1</sup>
	Equação para estimar DBO finamente particulada após tratamento	SS * [DBO/SS]	mg DBO <sub>SS</sub> .L <sup>-1</sup>
	Equação para estimar DBO total após tratamento	DBO <sub>sol</sub> + DBO <sub>SS</sub>	mg DBO.L <sup>-1</sup>
Coefficiente de remoção de coliformes	0,3	d <sup>-1</sup>	
Lagoa de maturação	Profundidade útil	1	m
	Número de aletas	4	unidade
	Coefficiente de remoção de coliformes	0,6	d <sup>-1</sup>
	Coefficiente de temperatura - θ	1,07	
	Tempo de detenção hidráulica	11	d
	Regime	Fluxo disperso	-
	Equação para obtenção do Número de dispersão	(L/B)/(-0,261+0,254*L/B)+1,014*(L/B) <sup>2</sup>	-

*Continua*

Continuação

Etapa	Parâmetro	Valor	Unidade	
Reator UASB	Coeficiente de produção de sólido em DQO - Y	0,18	kg SST. kg DQO <sub>ap</sub> <sup>-1</sup>	
	Coeficiente de produção de sólido em DQO - Y <sub>obs</sub>	0,21	Kg DQO. kg DQO <sub>ap</sub> <sup>-1</sup>	
	Tempo de detenção hidráulica	9	h	
	Altura útil do reator	5	m	
	Carga hidráulica volumétrica	2,67	m <sup>3</sup> .dia <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup>	
	Velocidade ascensional na manta de lodo - média	0,45	m.h <sup>-1</sup>	
	Velocidade ascensional na manta de lodo - máxima	0,56	m.h <sup>-1</sup>	
	Equação para estimar UFC após tratamento	$100 \times (1 - 0.68 \times t^{-0.35})$	%	
	Equação para estimar DBO após tratamento	$100 \times (1 - 0.70 \times t^{-0.50})$	%	
Lodos Ativados	Tipo	Aeração prolongada	Aeração prolongada (pós UASB)	-
	Idade do lodo	18-30	6.0-10	d
	Concentração de sólidos em suspensão	4000	1500	mg.l <sup>-1</sup>
	Tempo de detenção hidráulica	28	6,2	h
	Taxa de retorno de lodo - Q <sub>r</sub> /Q	1,00	0,6	-
	Altura útil do tanque de aeração	4	4	m
	Oxigênio dissolvido	0,9	0,9	kg O <sub>2</sub> .Kg DBO <sub>ap</sub> <sup>-1</sup>
	Relação Alimento/Microrganismo	0,11	0,30	kg DBO.kg SS <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
	Geração de lodo em excesso	1	0,84	Kg SS.kg DBO <sup>-1</sup>
	Concentração de retorno de lodo	8	4	Kg SS.m <sup>-3</sup>
	Regime	Mistura completa		-
	Tipo de aeração	Mecânica		-
	Coeficiente de produção celular - Y	1	0,84	gSSV.gDBO <sup>-1</sup>
	Tempo de detenção hidráulica mínimo no sedimentador	1,5	1,5	h
	Taxa de aplicação de sólidos no sedimentador - GA	5	5	kg.m <sup>-2</sup> .h <sup>-1</sup>
Altura útil	3,5	3,5	m	
Leito de secagem	Tempo de ciclo	15	15	d
	Razão de aplicação de sólidos	12	12	kg SS.m <sup>-2</sup>
	Taxa de produção de lodo	43	26	g SS.habitantes <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
	Taxa de produção de lodo	0,14	0,08	l.habitantes <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup>
	Concentração do lodo em peso seco	0,64	3,5	%
	Densidade do lodo desaguado	1,06	1,06	kg.m <sup>-3</sup>
	Sólidos no lodo desaguado	95	95	%

Fonte: Andreoli, von Sperling, Fernandes (2007), Chernicharo (2007), von Sperling (2007a, 2007b).

O levantamento dos materiais necessários para a construção das 3 ETEs foram obtidas a partir de um estudo de concepção de tratamento de esgoto sanitário com Memorial de Cálculo com levantamento de quantitativos de serviços. Esses quantitativos foram feitos para atender o esgoto sanitário gerado por uma população de 1934 habitantes, porém sem apresentar as planilhas de dimensionamento (não publicado). Desta maneira, para que pudessem ser usadas como base, foi feito um dimensionamento de acordo com os parâmetros e o método utilizado para os 3 sistemas de tratamento em estudo. Ao alcançar volumes dos tanques principais semelhantes ao da Memória de Cálculo, foram definidas relações de serviço e materiais por volume e estas relações foram utilizadas para o levantamento dos materiais e serviços das ETEs em estudo.

Posteriormente, os serviços e materiais foram convertidos em materiais consumíveis (areia, água, energia elétrica, diesel, brita, cimento e outros). Tal conversão foi baseada em dados obtidas em pesquisas a *webpages* e dados de construtoras. Os principais fatores de conversão e suas fontes são apresentados na Tabela 11. Finalmente, os materiais foram consolidados e divididos pela unidade funcional definida (metro cúbico de esgoto sanitário a ser tratado) obtendo-se o Inventário do Ciclo de Vida da construção.

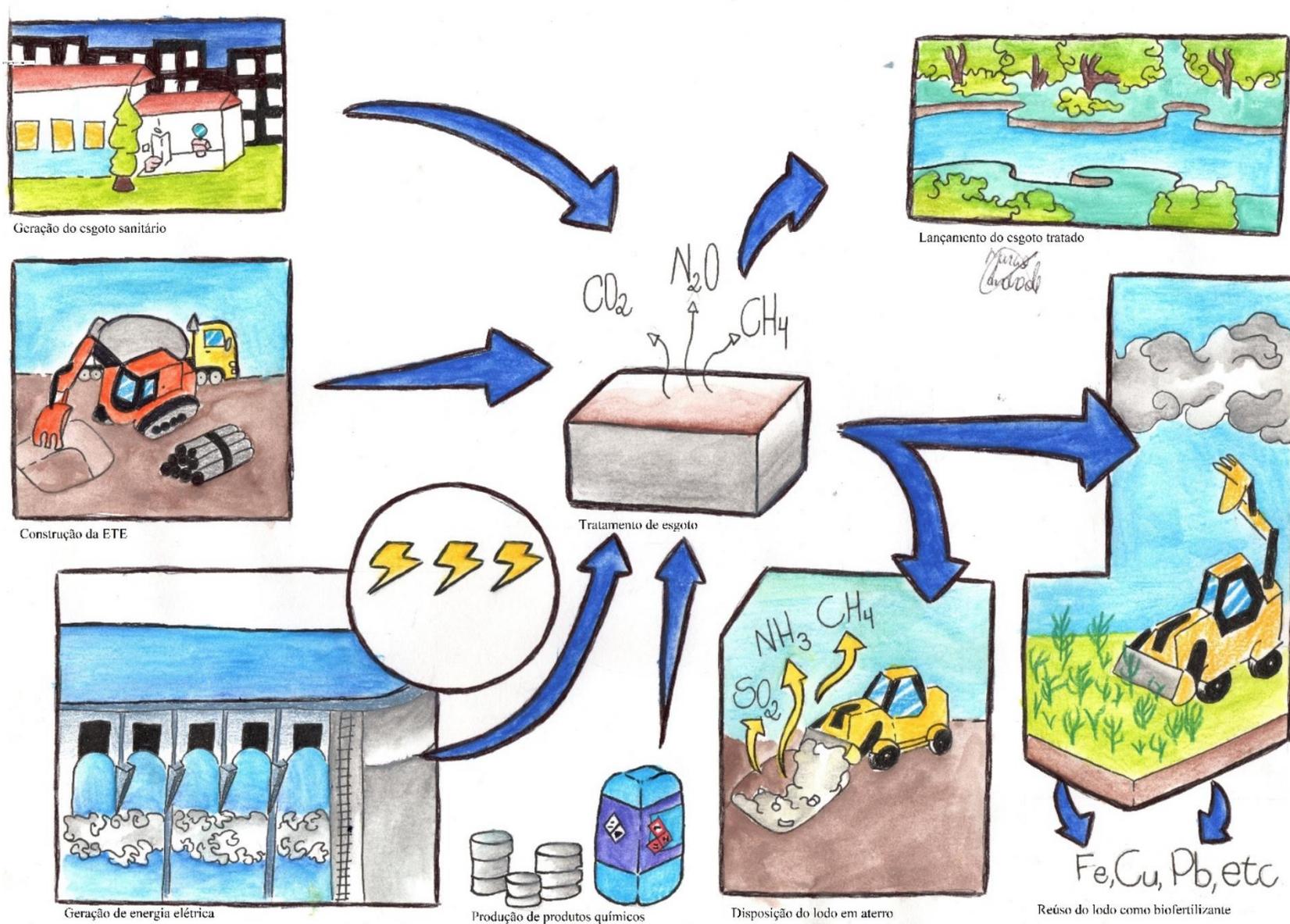
As principais entradas e saídas do inventário consideradas para os sistemas em estudo e subprocessos são representadas na Figura 17.

**Tabela 11** – Fatores para conversão de matérias e serviços em materiais disponíveis no *Ecoinvent*<sup>®</sup>.

Nome	Material	Consumo	Rendimento	Fonte
Retroescavadeira	Óleo diesel	8 l.h <sup>-1</sup>	11.5 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	<a href="https://dimaqcba.com.br/blog/2017/04/05/retroescavadeira-x-mini-escavadeira-quem-e-a-melhor/">https://dimaqcba.com.br/blog/2017/04/05/retroescavadeira-x-mini-escavadeira-quem-e-a-melhor/</a>
<i>Bobcat</i> (aterro)	Óleo diesel	10.6 l.h <sup>-1</sup>	80 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	<a href="https://electrimaq.cl/fichas_tecnicas/bobcat-s530.pdf">https://electrimaq.cl/fichas_tecnicas/bobcat-s530.pdf</a>
Compactador de placa vibratória	Gasolina	1.4 l.h <sup>-1</sup>	10 m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup>	<a href="https://www.petrotec.com.br/equipamentos/placa-vibratoria/">https://www.petrotec.com.br/equipamentos/placa-vibratoria/</a>
Caminhão caçamba	Óleo diesel	0.2 l.km <sup>-1</sup>	17 m <sup>3</sup>	<a href="https://mpterraplenagem.com.br/produto/caminhao-basculante-volkswagen-constellation-31-320/">https://mpterraplenagem.com.br/produto/caminhao-basculante-volkswagen-constellation-31-320/</a>
Misturador de concreto	Eletricidade	550 W	120 l	Experimental
Concreto não estrutural	1 kg cimento/4 m <sup>3</sup> areia/6 m <sup>3</sup> brita			Adaptado de NBR 6118/78
Concreto não estrutural	1 kg cimento/2 m <sup>3</sup> areia/2.5 m <sup>3</sup> brita			<a href="https://construfacilrj.com.br/dosagem-e-tabela-pratica-para-traco-do-concreto/">https://construfacilrj.com.br/dosagem-e-tabela-pratica-para-traco-do-concreto/</a>
Massa asfáltica	GLP	2.5 kg.h <sup>-1</sup>	7.5 m <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup>	Experimental
	Água	0.01 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup>		
Canteiro de obra	Eletricidade	0.27 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup>	kwh/m <sup>2</sup>	<a href="http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400186">http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400186</a>

Fonte: Própria autora.

**Figura 17** - Representação das principais entradas e saídas do inventário e dos subprocessos relevantes para os sistemas avaliados.



Fonte: Feito por Márcio Andrade Lima a pedido da autora.

### 5.3. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Os impactos ambientais decorrentes das entradas e saídas definidas na fase de inventário foram classificados e caracterizados utilizando o método *IMPACT World+* versões “*Continental Latin America\_Damage 1.431*” e “*Continental Latin America\_Midpoint 1.251*” no programa *Open LCA 1.10.3*. O *IMPACT World+* foi desenvolvido para levar em consideração as variabilidades espaciais na obtenção dos fatores de caracterização permitindo a Regionalização nesta etapa da ACV. A Regionalização da ACV com a obtenção de resultados mais acurados é o objetivo principal deste trabalho.

### 5.4. Interpretação

A interpretação foi realizada em todas as etapas da ACV na medida em que foram realizadas as pesquisas, para atendimento aos elementos estabelecidos na norma ABNT 14044 e na publicação *Life cycle assessment: an operational guide to the ISO Standards* (ABNT, 2009b, 2009a; GUINÉE et al., 2001b, 2001a).

Os resultados dos impactos ambientais de cada ETE foram comparados aos das demais ETEs. Assim como as fases do ciclo de Vida (Construção, Operação, Destinação do Lodo e Lançamento do esgoto tratado) foram avaliadas apontando os principais aspectos para cada fase. Na construção, avaliou-se também a contribuição de cada etapa dos sistemas (pré-tratamento, secundário, remoção/inativação de agentes patogênicos e secagem do lodo gerado). A ACV do esgoto sanitário sem tratamento foi utilizada para comparar a redução dos danos ambientais pelos sistemas de tratamento de esgoto sanitário.

#### 5.4.1. Análises de Sensibilidade

Foram realizadas Análises de Sensibilidade para os itens identificados como importantes fontes de contribuição para os danos ambientais:

- a. Destinação do lodo: com a alternativa de utilização como biofertilizante em substituição a produção do sulfato de amônia;
- b. Provedor de energia elétrica: alteração do provedor de eletricidade “*market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, S – BR*” para a

opção global “*market for electricity, medium voltage | electricity, medium voltage | Cutoff, S – RoW*”;

- c. Quantidade de energia elétrica consumida: inclusão de dois cenários para cada sistema com as quantidades mínimas e máximas relatadas no levantamento das ETEs em operação;
- d. Regionalização do método de caracterização: Uso da versão Default do método *Impact World+*;
- e. Método de caracterização: Quantificação dos impactos ambientais das 3 configurações de tratamento e do esgoto sanitário sem tratar pelo uso do *ReCiPe 2016*.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Inventário do Ciclo de Vida

#### 6.1.1. Estudo de contribuição ao impacto e variabilidade dos dados

Os valores de contribuição e variabilidade para as entradas/saídas mais relevantes estão apresentados na Tabela 12 por Área de Proteção (AP) impactada. As 3 entradas e saídas do inventário com maiores contribuição para os impactos foram agrupadas de acordo com o subprocesso e estão apresentadas na Figura 18.

De acordo com esta avaliação, há uma grande contribuição da etapa de Construção para os impactos das ETEs Lagoas de Estabilização e Reator UASB + Lodos Ativados, associada a falta de variabilidade por falta de dados bibliográficos, estes dois fatores apontam a necessidade de inventariar esta etapa. Foi necessário buscar mais dados sobre a destinação em aterros sanitários, visto que a opção adotada neste Estudo de contribuição e variabilidade, digestão anaeróbia de lodos apresentou contribuição entre 13 e 19% dos danos para a área de proteção saúde humana, em anos de incapacidade (DALY), para as ETEs Lagoas e Lodos Ativados. Além disso, o destino mais usado para o lodo de ETEs, no Brasil de acordo com o levantamento de ETEs, é o aterramento.

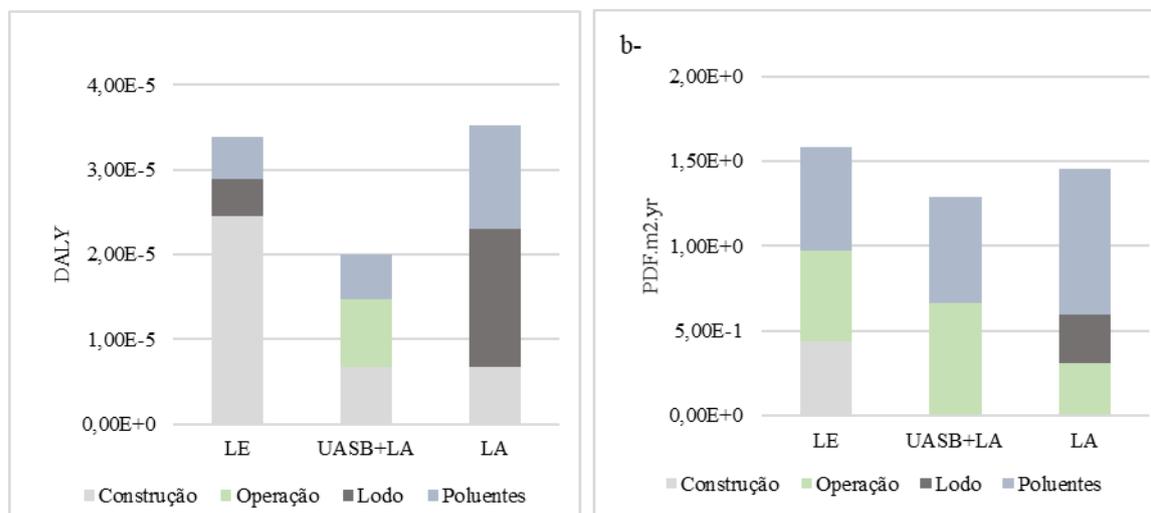
Dos 9 metais considerados presentes no esgoto tratado (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn), o Cu se destacou ao contribuir com aproximadamente 11% dos danos para as ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados para a área de proteção qualidade dos ecossistemas, em potencial de desaparecimento de fração de espécies por área e ano (PDF.m<sup>2</sup>.yr). Assim foi preciso buscar dados adicionais sobre os metais no esgoto doméstico de ETEs brasileiras, visto que o valor utilizado provêm apenas do trabalho Hernández-Padilla et al. (2017), um consolidado para a América Latina e Caribe.

**Tabela 12** - Contribuições e variabilidades das entradas do inventário na análise de dados.

<b>Área de proteção - Saúde humana</b>				
Tipo de ETE	Parâmetro	Contribuição para o problema	Variabilidade dos dados	Categoria de impacto
Lagoas de Estabilização	Areia grossa	60%	1,00	Disponibilidade de água
	Digestão anaeróbia do lodo	13%	1,00	Disponibilidade de água
	Cimento Portland	12%	1,00	Disponibilidade de água
R. UASB + Lodos Ativados	Areia grossa	33%	1,00	Disponibilidade de água
	Hipoclorito de sódio	28%	1,47	Disponibilidade de água
	Energia elétrica	12%	0,54	Disponibilidade de água
Lodos Ativados	Poliacrilamida	28%	1,41	Disponibilidade de água
	Digestão anaeróbia do lodo	19%	1,50	Disponibilidade de água
	Areia grossa	19%	1,00	Disponibilidade de água
<b>Área de proteção - Qualidade dos ecossistemas</b>				
Tipo de ETE	Parâmetro	Contribuição para o problema	Variabilidade dos dados	Categoria de impacto
Lagoas de Estabilização	Metano	34%	1,00	Mudanças Climáticas - curto termo
	Areia grossa	23%	1,00	Ecotoxicidade - água doce
	Cimento Portland	5%	1,00	Ecotoxicidade - água doce
R. UASB + Lodos Ativados	Metano	29%	1,00	Mudanças Climáticas - curto termo
	Cobre no efluente	11%	1,00	Ecotoxicidade - água doce
	Energia elétrica	11%	0,54	Ecotoxicidade - água doce
Lodos Ativados	Poliacrilamida	20%	1,41	Ecotoxicidade - água doce
	Energia elétrica	11%	0,28	Ecotoxicidade - água doce
	Cobre no efluente	10%	1,00	Ecotoxicidade - água doce

Fonte: Própria autora.

**Figura 18** - Contribuições por estágios do ciclo de vida da avaliação de dados realizada para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).



Fonte: Própria autora.

### 6.1.2. Inventários obtidos

Os quantitativos de materiais consumidos ou gerados nas fases de Operação, Destinação do lodo, Lançamento do esgoto tratado e Construção são apresentados nos itens 6.1.2.1, 6.1.2.2, 6.1.2.3 e 6.1.2.4.

#### 6.1.2.1. Inventário de Operação

No estágio de Operação (Tabela 13), destaca-se que o consumo de eletricidade na ETE Reator UASB + Lodos Ativados (UASB + Lodos Ativados) é apenas 8% menor do que na ETE Lodos Ativados (LA). Isto pode ser um indicativo de má operação dos sistemas levantados, visto que a maior parte da eletricidade é consumida na aeração para remoção de matéria orgânica e o Lodos Ativados, como tratamento complementar do Reator UASB, recebe bem menos matéria orgânica do que na ETE Lodos Ativados. A ETE Lagoas de Estabilização (LE) emite mais metano para a atmosfera do que o Reator UASB, porque nesse último parte do metano é captado e queimado no *flare* a dióxido de carbono, que não é contabilizado por ser de origem biogênica. Não há consumo de hipoclorito de sódio na ETE LE, pois a remoção/inativação organismos patogênicos ocorre na lagoa de maturação utilizando apenas fatores naturais (insolação, temperatura, fotossíntese etc.). Óxido nitroso é emitido igualmente nas ETEs Reator UASB + Lodos

Ativados e Lodos Ativados por essa ocorrer devido a remoção incompleta de nitrogênio no Lodos Ativados e o Reator UASB não remover nitrogênio.

**Tabela 13** – Consumos e emissões diretas por unidade funcional (m<sup>3</sup>) da etapa de operação das 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).

Estágio	Fluxo	Esgoto sanitário	LE	UASB+LA	LA	Unidade	Fonte
Operação	Elettricidade	-	2,51E-02	3,67E-01	4,01E-01	kWh	Questionário
	Hipoclorito de sódio	-	-	5,88E-03	5,88E-03	kg	Questionário
	Óxido nitroso	-	-	1,20E-02	1,20E-02	g	Gutierrez (2014)
	Metano	-	8,94E+01	2,95E+01	-	g	Gutierrez (2014)

Fonte: Própria autora.

#### 6.1.2.2. Inventário da Destinação de lodo

Os dados para este estágio foram obtidos para 1 tonelada de lodo gerada. Apesar de usar os mesmos dados, as quantidades de emissões e concentrações dos contaminantes do lodo aterrado variam de acordo com a massa seca do lodo de cada tipo de tratamento, como pode ser verificado na Tabela 14.

A mesma regra, igual concentração por massa seca dos poluentes, emissões e diferentes massas secas por tipos de ETEs, se aplicou na obtenção dos dados para uso do lodo como fertilizante, como pode ser observado na Tabela 15.

**Tabela 14** – Consumos e emissões da destinação dos lodos dos 3 sistemas em aterro: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).

Estágio	Fluxo	Esgoto sanitário	LE	UASB+LA	LA	Unidade	Fonte
Aterro	Transporte (caminhão)	-	2,18E+01	2,18E+01	2,18E+01	t*km	Questionário
	Transporte (tratores)	-	4,23E+00	4,23E+00	4,23E+00	t*km	Questionário
	Amônia (gás)	-	1,29E-01	1,29E-01	6,32E-04	kg	Gutierrez (2014)
	Amônia (líquido)	-	2,02E+04	2,02E+04	9,91E+01	mg	Gutierrez (2014)
	DBO	-	3,82E+04	3,82E+04	1,87E+02	mg	Gutierrez (2014)
	Monóxido de carbono	-	4,19E-02	4,19E-02	2,05E-04	kg	Gutierrez (2014)
	Metano	-	6,58E+00	6,58E+00	6,58E+00	kg	Gutierrez (2014)
	Metano	-	1,30E+05	1,30E+05	1,30E+05	mg	Gutierrez (2014)
	Nitrogênio	-	8,32E-01	8,32E-01	4,08E-03	kg	Gutierrez (2014)
	Nitrogênio Orgânico	-	1,55E+03	1,55E+03	7,58E+00	mg	Gutierrez (2014)
	Dióxido de enxofre	-	4,10E-01	4,10E-01	2,01E-03	kg	Gutierrez (2014)
	Arsênio	-	1,54E+04	1,54E+04	1,37E+04	mg	Ferraz, Poggiani (2014); Nascimento et al. (2020, 2014); Simonete, Kiehl (2002)
	Boro	-	9,65E+03	9,65E+03	8,57E+03	mg	
	Cálcio	-	1,86E+04	1,86E+04	1,65E+04	g	
	Cádmio	-	1,45E+03	1,45E+03	1,29E+03	mg	
	Cromo	-	3,18E+04	3,18E+04	2,82E+04	mg	
	Cobre	-	1,11E+05	1,11E+05	9,84E+04	mg	
	Chumbo	-	1,49E+03	1,49E+03	1,32E+03	mg	
	Magnésio	-	1,26E+04	1,26E+04	1,11E+04	g	
	Manganês	-	1,03E+03	1,03E+03	9,17E+02	mg	
	Mercúrio	-	7,21E+04	7,21E+04	6,40E+04	mg	
	Molibdênio	-	1,58E+03	1,58E+03	1,40E+03	mg	
	Níquel	-	3,75E+04	3,75E+04	3,33E+04	mg	
	Fósforo	-	6,65E+03	6,65E+03	5,90E+03	g	
	Potássio	-	3,06E+04	3,06E+04	2,72E+04	g	
	Enxofre	-	2,31E+03	2,31E+03	2,05E+03	g	
	Estanho	-	2,19E+02	2,19E+02	1,94E+02	mg	
	Zinco	-	3,03E+05	3,03E+05	2,69E+05	mg	

Fonte: Própria pela autora.

**Tabela 15** - Consumos e emissões da alternativa de disposição do lodo como fertilizantes para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).

Estágio	Fluxo	Esgoto sanitário	LE	UASB+LA	LA	Unidade	Fonte
Biofertilizante	Sulfato de amônio	-	-4,61E+01	-4,61E+04	-4,61E+01	kg	Nascimento et al. (2014)
	Cal	-	5,00E+02	5,00E+02	5,00E+02	kg	Nascimento et al. (2013)
	Transporte (caminhão)	-	4,23E+00	4,23E+00	4,23E+00	t*km	Questionário
	Transporte (trator)	-	8,19E+00	8,19E+00	8,19E+00	t*km	Gutierrez (2014)
	Arsênio	-	1,54E+04	1,54E+04	1,37E+04	mg	
	Boro	-	9,65E+03	9,65E+03	8,57E+03	mg	
	Cálcio	-	1,86E+04	1,86E+04	1,65E+04	g	
	Cádmio	-	1,45E+03	1,45E+03	1,29E+03	mg	
	Cromo	-	3,18E+04	3,18E+04	2,82E+04	mg	
	Cobre	-	1,11E+05	1,11E+05	9,84E+04	mg	
	Chumbo	-	1,49E+03	1,49E+03	1,32E+03	mg	Ferraz, Poggiani (2014);
	Magnésio	-	1,26E+04	1,26E+04	1,11E+04	g	Nascimento et al.
	Manganês	-	1,03E+03	1,03E+03	9,17E+02	g	(2020, 2013);
	Mercúrio	-	7,21E+04	7,21E+04	6,40E+04	mg	Simonete, Kiehl
	Molibdênio	-	1,58E+03	1,58E+03	1,40E+03	mg	(2002)
	Níquel	-	3,75E+04	3,75E+04	3,33E+04	mg	
	Fósforo	-	6,65E+03	6,65E+03	5,90E+03	g	
	Lodo	-	3,06E+04	3,06E+04	2,72E+04	m <sup>3</sup>	
	Enxofre	-	2,31E+03	2,31E+03	2,05E+03	g	
	Estanho	-	2,19E+02	2,19E+02	1,94E+02	mg	
Zinco	-	3,03E+05	3,03E+05	2,69E+05	mg		

Fonte: Própria autora.

### 6.1.2.3. Inventário do lançamento de esgoto tratado

Neste inventário, quantificou-se as concentrações dos poluentes no esgoto tratado e no esgoto sanitário sem tratamento (Tabela 16). Exceto os parâmetros DBO, nitrogênio e fósforo que foram obtidos das respostas das concessionárias no levantamento das ETEs, os demais foram considerados como contendo a mesma concentração por parâmetro para as três ETEs, visto a pouca disponibilidade de dados por tipo de tratamento. A ETE Lodos Ativados é mais eficiente para a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo e com isso apresenta menores concentrações para estes parâmetros.

**Tabela 16** – Concentrações dos poluentes do esgoto sanitário e poluentes remanescentes para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA).

Estágio	Fluxo	Esgoto	LE	UASB+LA	LA	Unidade	Fonte
Poluentes Remanescentes	DBO	2,78E-01	4,48E-02	1,90E-02	2,39E-02	kg	Questionário
	Nitrogênio	4,80E-02	2,80E-02	2,20E-02	1,89E-02	kg	Questionário
	Fósforo total	8,20E+00	6,00E-03	5,00E-03	2,70E-03	kg	Questionário
	Alumínio	1,80E+03	1,74E+00	1,74E+00	1,74E+00	g	
	Arsênio	1,00E-05	-	-	-	g	
	Bário	1,02E-01	6,10E-02	6,10E-02	6,10E-02	g	
	Boro	1,20E-02	1,70E-01	1,70E-01	1,70E-01	g	
	Cádmio	2,13E-03	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05	g	
	Cálcio	1,11E-02	1,10E+01	1,10E+01	1,10E+01	g	
	Cromo	6,10E-02	4,90E-03	4,90E-03	4,90E-03	g	da Fonseca et al. (2007);
	Cobre	1,22E-01	1,40E-02	1,40E-02	1,40E-02	g	Oliveira et al. (2007);
	Ferro	2,58E+00	1,29E+00	1,29E+00	1,29E+00	g	Pipi et al. (2018); Souza et al. (2014);
	Chumbo	2,88E-02	2,40E-02	2,40E-02	2,40E-02	g	Tonani et al. (2011)
	Mercúrio	4,67E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	g	
	Potássio	1,30E+00	2,45E+01	2,45E+01	2,45E+01	g	
	Magnésio	1,90E+00	2,55E+00	2,55E+00	2,55E+00	g	
	Manganês	1,65E-01	1,03E-01	1,03E-01	1,03E-01	g	
	Sódio	1,30E+00	9,45E+01	9,45E+01	9,45E+01	g	
	Níquel	3,87E-02	-	-	-	g	
	Enxofre	2,64E+01	-	-	-	g	
Selênio	1,00E-05	-	-	-	g		
Zinco	3,28E-01	3,30E-02	3,30E-02	3,30E-02	g		
Sulfato		4,90E+00	4,90E+00	4,90E+00	g		

Fonte: Própria autora.

#### 6.1.2.4. Inventário de Construção das ETEs

A ETE Lagoas de Estabilização (LE) apresenta os maiores volumes e áreas das três ETEs avaliadas, conforme apresentado na Tabela 17. Isto porque a ETE Lagoas de Estabilização tem um tempo de detenção hidráulica (TDH) maior, medido em dias, enquanto a ETE Lodos Ativados (LA) e o Reator UASB têm um TDH menor, medido em horas. Esta diferença no TDH é necessária porque as Lagoas de Estabilização dependem de fatores naturais, principalmente insolação e temperatura, e da geometria das lagoas, para a remoção dos poluentes. A adoção do Reator UASB associado ao Lodos Ativados reduz significativamente o volume do tanque de aeração e do sedimentador requeridos para o tratamento do mesmo efluente apenas por Lodos Ativados. Ao consideramos o volume total de cada ETE (somatório dos volumes dos reatores e tanques), o volume requerido do sistema Reator UASB + Lodos Ativados é menor do que no Lodos Ativados.

Isto porque o reator UASB é compacto em virtude da alta carga hidráulica volumétrica e da retenção de microrganismos anaeróbios em seu interior (CHERNICHARO, 2007; VON SPERLING, 2007c, 2007b; VON SPERLING; CHERNICHARO, 2007).

**Tabela 17** - Volumes e áreas dos principais reatores (tanques e lagoas) para as 3 ETEs: Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB+ Lodos Ativados e Lodos Ativados (LA).

Sistema	Etapa	Item(s)	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume total (m <sup>3</sup> )
Lagoas de Estabilização	Lagoa Anaeróbia	1	3472	816	3472
	Lagoa Facultativa	1	14870	9914	14870
	Lagoa de maturação	1	10905	10905	10905
Reator UASB + Lodos Ativados	Reator UASB	1	372	74	3712
	Tanque de aeração	1	257	64	257
	Sedimentador	2	56	8	111
Lodos Ativados	Tanque de aeração	1	1156	258	1156
	Sedimentador	2	83	12	166

Fonte: Própria autora.

Ainda que a ETE Lagoas de Estabilização apresente um volume total superior ao das outras duas ETEs, esta ETE é a maior consumidora apenas de óleo diesel, sendo a menor consumidora de ferro fundido, de aço e de concreto (somatório de cimento, areia e brita), conforme apresentado na Tabela 18. O óleo diesel é consumido principalmente pelas máquinas na escavação das lagoas. A ETE Lodos Ativados é a maior consumidora da maioria dos materiais, principalmente a etapa de tratamento secundário (tanque de aeração e sedimentador). A diferença na quantidade desses materiais entre as 3 ETEs se deve ao fato das ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados utilizarem o sistema de construção concreto reforçado, enquanto as três lagoas são feitas por escavação de solo com revestimento em PEAD.

Para facilitar a comparação dos resultados obtidos com outros trabalhos, foi elaborada a Tabela 19. Nem todos os materiais levantados no presente trabalho constam desta Tabela, a qual prioriza os materiais levantados pelos artigos encontrados na revisão bibliográfica. Também foram incluídos dados sobre a vazão de tratamento de projeto e a vida útil adotada, visto que enriquecem a comparação dos dados.

**Tabela 18** - Materiais consumidos na fase de construção, abertos por estágios de tratamento das 3 ETEs : Lagoas de Estabilização (LE), Reator UASB + Lodos Ativados (UASB+LA) e Lodos Ativados (LA). Todos os resultados são apresentados por 1m<sup>3</sup> de esgoto.

Materiais (detalhes)	Unidade	Estágio	Tratamento Secundário			Remoção/inativação de patógenos			Leito de secagem	Total		
		Pré-Tratamento	LE	UASB+LA	LA	LE	UASB+LA/LA	UASB+LA/LA		LE	UASB+LA	LA
Ferro fundido	kg	1,51E-06	0,00E+00	4,55E-04	7,16E-04	0,00E+00	3,54E-05	0,00E+00	1,51E-06	4,91E-04	7,53E-04	
Cimento Portland	kg	6,08E-04	5,09E-03	1,67E-02	2,59E-02	3,26E-03	1,97E-03	3,42E-03	8,96E-03	2,27E-02	3,19E-02	
Tijolos de barro	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,96E-03	0,00E+00	2,96E-03	2,96E-03	
Diesel	MJ	4,10E-03	1,71E-01	5,97E-03	8,20E-03	1,46E-01	9,08E-04	2,36E-03	3,21E-01	1,33E-02	1,56E-02	
Eletricidade	kWh	4,23E-07	4,73E-07	3,59E-06	1,10E-05	3,34E-07	6,58E-06	2,08E-05	1,23E-06	3,14E-05	3,88E-05	
Fibra de vidro	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,39E-07	0,00E+00	1,39E-07	1,39E-07	
Brita	kg	5,40E-03	1,97E-02	7,88E-02	1,21E-01	1,26E-02	1,11E-02	3,60E-02	3,77E-02	1,31E-01	1,74E-01	
Massa asfáltica	kg	0,00E+00	0,00E+00	2,14E-02	3,37E-02	0,00E+00	3,62E-03	2,76E-03	0,00E+00	2,78E-02	4,01E-02	
Polipropileno	kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,54E-06	0,00E+00	2,54E-06	2,54E-06	
Tubos de Polipropileno	m	0,00E+00	4,79E-05	0,00E+00	0,00E+00	4,68E-05	0,00E+00	2,33E-05	9,47E-05	2,33E-05	2,33E-05	

*Continua*

*Continuação*

Materiais (detalhes)	Estágio Unidade	Pré- Tratamento 3 ETEs	Tratamento Secundário			Remoção/inativação de patógenos			Leito de secagem UASB+LA/ LA	Total		
			LE	UASB+LA	LA	LE	UASB+LA/ LA	UASB+LA/ LA		LE	UASB+LA	LA
PVC	kg	1,28E-05	1,04E-04	2,18E-04	3,50E-04	5,18E-05	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-04	2,30E-04	3,63E-04	
Aço reforçado	kg	1,99E-04	1,02E-03	6,99E-03	1,09E-02	6,53E-04	4,78E-03	7,76E-04	1,87E-03	1,27E-02	1,66E-02	
Areia	kg	3,04E-03	1,85E-02	6,01E-02	9,32E-02	1,19E-02	6,98E-03	1,56E-02	3,34E-02	8,58E-02	1,19E-01	
Madeira	m <sup>3</sup>	4,53E-08	0,00E+00	1,36E-05	2,15E-05	0,00E+00	1,06E-06	1,05E-06	4,53E-08	1,58E-05	2,36E-05	
Aço laminado	kg	2,11E-07	0,00E+00	2,27E-04	3,46E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,11E-07	2,27E-04	3,46E-04	
Água	kg	0,00E+00	1,75E-03	2,08E-03	3,19E-03	1,23E-03	2,14E-04	7,71E-04	2,98E-03	3,07E-03	4,18E-03	
Transporte (GLP, automóvel médio porte, EURO 5)	km	0,00E+00	0,00E+00	2,29E-03	3,61E-03	0,00E+00	3,87E-04	2,94E-04	0,00E+00	2,97E-03	4,29E-03	
Transporte (gasolina, automóvel pequeno porte, EURO 3)	km	1,92E-08	2,45E-06	1,66E-06	5,62E-06	2,59E-06	1,29E-08	8,43E-09	5,05E-06	1,70E-06	5,66E-06	
Compressor de ar (parafuso, 4 kW)	Item	0,00E+00	0,00E+00	1,38E-07	1,38E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,38E-07	1,38E-07	

Fonte: Própria Autora

**Tabela 19** – Resumo dos inventários de ETEs comparados aos do presente trabalho

Identificação Material	Reator UASB + Complementar		Lodos Ativados				Lagoas de Estabilização		
	Lopes	Presente	LA Girona	LA Mill Creek	LA 1	LA 2	Presente	Güereca	Presente
Concreto (kg.m <sup>-3</sup> )			1,4E-01	6,4E-02	3,6E-02	2,4E-02	3,3E-01	1,4E-01	8,0E-02
Aço (kg.m <sup>-3</sup> )	5,7E-02	1,3E-02	4,9E-03	2,6E-03	-	-	1,7E-02	-	1,9E-03
Cimento (kg.m <sup>-3</sup> )	8,5E-02	2,3E-02	1,5E-03	-	-	-	3,2E-02	-	
Óleo Diesel (MJ)		1,3E-02	3,0E-02	-	6,1E-04	-	1,6E-02	4,6E-02	3,2E-01
Vazão de projeto (m <sup>3</sup> .dia)	285	991	55.000	454.200	1.555	124.157	991	1037	991
Vida útil	20	20	-	-	20	20	20	20	20
Fonte	Lopes et al. (2020)		NGUYEN et al. (2020)	NGUYEN et al. (2020)	Güereca et al. (2011)	Güereca et al. (2011)		Güereca et al. (2011)	8,0E-02

Fonte: Própria autora.

O sistema de tratamento composto por Reator UASB + Lodos Ativados demanda menos materiais do que o sistema Reator UASB + *Wetlands* Construídos levantado por Lopes et al. (2020). Diferença, possivelmente, devido a: 1- o levantamento de materiais consumidos foi feito diretamente na construção de uma ETE real em operação no Brasil; 2- a ETE avaliada por Lopes et al. (2020) foi construída para atender uma vazão de esgoto sanitário menor (29% da presente vazão); 3- A ETE tem *Wetlands* Construídos como tratamento complementar ao Reator UASB, um sistema menos intensivo do ponto de vista construtivo do que o Lodos Ativados (LA) que adotamos.

O sistema de tratamento Lagoas de Estabilização, com vazão semelhante à adotada no presente trabalho, foi inventariado por Güereca et al. (2011), utilizando relatórios técnicos. Enquanto a demanda do presente trabalho por concreto foi 75% menor do que a do trabalho de Güereca, no presente trabalho foi estimado um consumo de óleo diesel 86% superior. Tal relação entre consumo destes materiais, que é semelhante as que obtivemos para os sistemas em concreto armado, pode indicar a utilização de modo construtivo diferente do que foi projetado no presente estudo. Outra hipótese, é que este outro modo construtivo, pode ter sido adotado devido a variações específicas das características do local de instalação e/ou dos parâmetros de configuração do sistema Lagoas de Estabilização.

A realização e a publicação de Inventários de construção de ETEs Lodos Ativados são mais frequentes. 2 trabalhos cada um com duas ETEs inventariadas foram encontrados e avaliados. Güereca et al. (2011) inventariaram a construção de duas ETEs, uma de pequeno porte e outra de grande porte, ambas na América Latina. Nguyen et al. (2020) apresentaram inventários de construção de duas ETEs, uma em operação em Girona na Espanha e a outra em Mill Creek nos EUA, a primeira de porte grande e a segunda de porte extragrande. Comparando a presente ETE Lodos Ativados com essas outras 4, a presente ETE demanda mais concreto e mais aço, o que poderia ser justificado apenas como economia de escala, visto que esta é a menor de todas. Entretanto, a ETE LA1 inventariada por Güereca et al. (2011), também de pequeno porte, consome menos concreto que as 2 ETEs apresentadas por Nguyen et al. (2020), Girona e Mill Creek. Quando avaliando o consumo de aço, não inventariado por Güereca et al. (2011), a presente ETE demanda aço numa ordem de magnitude acima que as duas apresentadas por Nguyen et al. (2020). Em relação a óleo diesel, a ETE LA1 inventariada por Güereca et al. (2011) demanda este material em 2 ordens de magnitude abaixo que Girona e o levantado neste trabalho.

Morera et al. (2020) obtiveram equações para prever alguns materiais usados na construção de sistema Lodos Ativados, de pequeno a médio porte, a partir do orçamento de construção de ETE com Lodos Ativados por Valas de oxidação. Quando aplicado a vazão do presente trabalho, única variável, nessas equações: a demanda de óleo diesel obtida é maior, porém na mesma ordem de grandeza do que a estimada originalmente, já o consumo de concreto e de aço estimados pelas equações são menores em uma ordem de grandeza.

A partir destas comparações, conclui-se que a economia de escala não aparenta ser o único fator de influência quando inventariando construção de ETEs. Outros fatores, como princípios construtivos, parâmetros de dimensionamento, modo de obtenção do inventário devem interferir significativamente nos quantitativos de materiais.

## 6.2. Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

Os estágios do ciclo de vida dos sistemas de tratamento de esgoto sanitário foram divididos em:

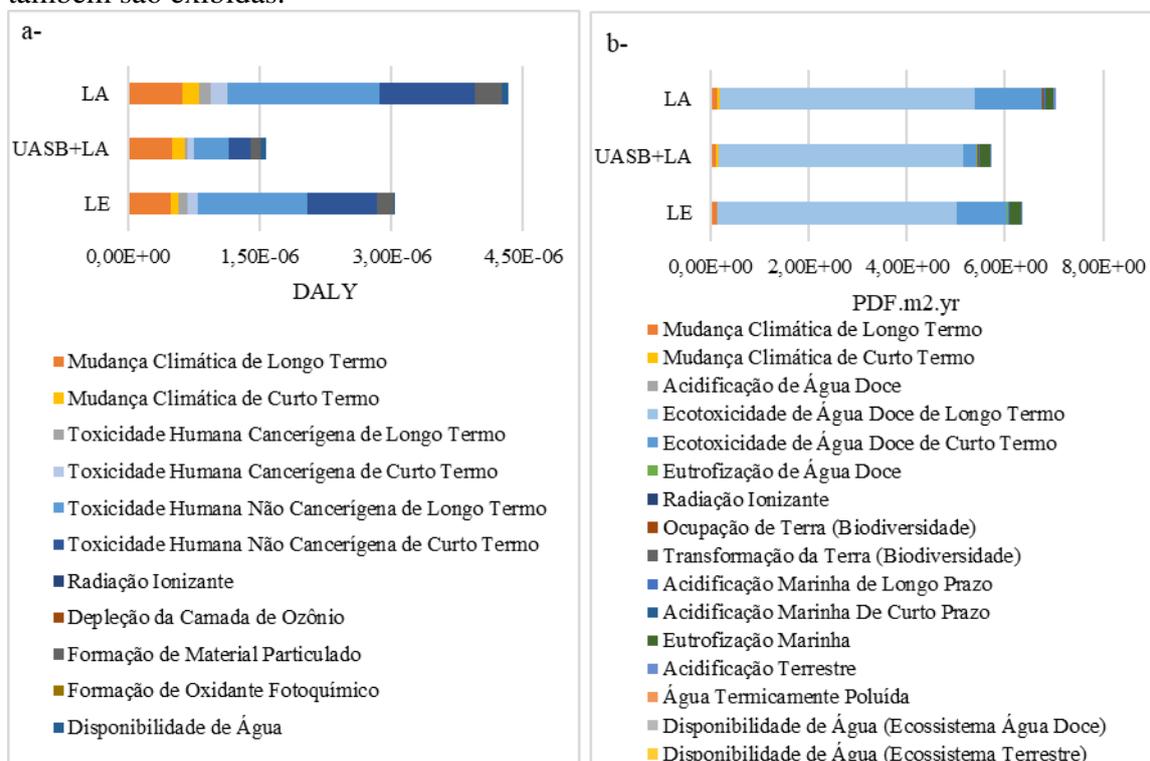
- Construção: incluindo a fabricação e o transporte dos materiais de construção, a construção em si com os consumos de materiais, de energia elétrica, de combustíveis (gasolina, GLP e óleo diesel) e as emissões geradas;
- Operação: os consumos de hipoclorito de sódio (não aplicável para a Lagoas de Estabilização) e de energia elétrica e as emissões atmosféricas;
- Destinação do lodo: transporte do lodo gerado para aterro sanitário, consumos e emissões (gasosas e líquidas) do processo de aterramento e as características químicas do lodo aterrado;
- Lançamento do esgoto tratado: Fluxo de saída do tratamento, no qual são considerados os poluentes remanescentes do tratamento de esgoto sanitário (DBO, nitrogênio e fósforo totais e diversos metais).

Avaliando os resultados da AICV sobre as 2 áreas de proteção: Saúde humana, em Anos de incapacidade (DALY), e Qualidade dos ecossistemas, em Potencial de desaparecimento de fração de espécies por área e ano (PDF.m2.yr), a ETE Reator UASB + Lodos Ativados apresenta menor potencial de danos que as outras 2 ETEs, Lodos Ativados e Lagoa de Estabilização, apesar dos valores estarem todos na mesma ordem de magnitude. Para a área de proteção saúde humana, o impacto estimado da ETE Reator UASB + Lodos Ativados corresponde a 51% do impacto da ETE Lagoas de Estabilização

e 36% do impacto da ETE Lodos Ativados. Para a área de proteção qualidade dos ecossistemas, as diferenças são menores, 11% para a ETE Lagoas de Estabilização e 19% para a Lodos Ativados, visto que os poluentes remanescentes são os grandes contribuintes para essa área de proteção e estes foram considerados iguais para as 3 configurações de ETEs. Os danos da ETE Lodos Ativados também superam os estimados para a ETE Lagoas de Estabilização para as 2 áreas de proteção. Os resultados com abertura por categorias de impacto são apresentados na Figura 19.

Na Figura 19, também pode se verificar que as categorias de maior contribuição para a área de proteção saúde humana são as Toxicidades Humanas Não Cancerígenas de longo e curto termo e a Mudança Climática de Longo Termo. Ambas as contribuições das categorias Toxicidades Humanas Não Cancerígenas de Longo e Curto Termo, entre 41% (Reator UASB + Lodos Ativados) e 67% (Lodos Ativados), são devidas principalmente a concentração de arsênio no lodo aterrado para as 3 ETEs avaliadas. Isto porque as mesmas concentrações (em massa seca) foram adotadas para os lodos oriundos das 3 configurações.

**Figura 19** - Resultados da AICV dos 3 sistemas de tratamento de esgoto. Impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (à direita). As contribuições de suas respectivas categorias de impacto também são exibidas.



Fonte: Própria autora.

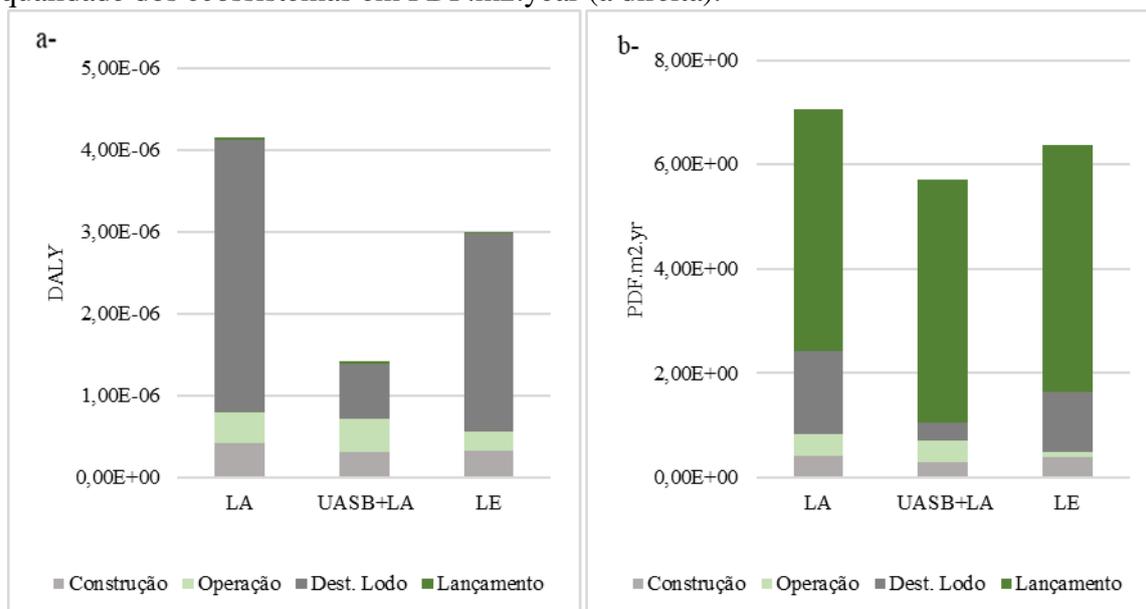
Para a categoria Mudança Climática de Longo Termo, a ETE LA tem o consumo de energia elétrica na operação (34%) como maior contribuinte para os danos à saúde humana, seguido da geração de metano durante o aterramento do lodo (11%). Na ETE Lagoas de Estabilização, 16% dos danos são devido a Categoria Mudança Climática de Longo Termo sobre a saúde humana, consequência da produção de metano, que não é captado, portanto não sendo queimado a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principalmente durante a fase de operação da lagoa anaeróbia e da lagoa facultativa. O restante da geração de metano ocorre na fase de aterramento do lodo. Diferente das outras 2 ETEs, a Mudança Climática de Longo Termo é a categoria de impacto de maior contribuição para a ETE Reator UASB + Lodos Ativados, mas não por conta do metano produzido na operação e sim devido ao consumo de eletricidade na etapa complementar de Lodos Ativados. Isto associado ao fato da ETE Reator UASB + Lodos Ativados gerar menor quantidade de lodo, 28% em relação a quantidade gerada na ETE Lagoas de Estabilização e 18% da ETE Lodos Ativados, e com isso ter menor potencial de impactos associados a esse resíduo. Em relação ao metano produzido a partir da conversão da matéria orgânica na fase de operação, no Reator UASB, diferente da ETE LE, é possível captar parte do metano produzido (68%) queimando-o a CO<sub>2</sub> no *flare*. Todo o CO<sub>2</sub> produzido na operação das ETEs e na destinação do lodo são de origem biogênica, não sendo computados como contribuintes para a Mudança Climática de acordo com o relatório de 2007 do IPCC (COMMISSION; JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010).

O CO<sub>2</sub> emitido nas ETEs, seja este originado na conversão de matéria orgânica a CO<sub>2</sub> no tratamento do esgoto sanitário ou no aterramento do lodo, foi considerado de origem biogênica, o que não acrescenta impactos ambientais no modelo de caracterização utilizado, e nem nos alternativos visto que todos seguem recomendação do IPCC, e por isto não foi inventariado. Se este pressuposto não tivesse sido adotado, os impactos ambientais devido as categorias de mudança climática de curto e longo prazo para ambas as áreas de proteção seriam maximizados. De acordo com o Dr. Noyola (Material não publicado), a configuração Lodos Ativados produz 0,264 kg de CO<sub>2</sub> por kg DQO removido, já os tratamentos anaeróbios produzem 0,453 kg de CO<sub>2</sub> por kg DQO removido. No caso do Reator UASB, ainda é necessário estimar a conversão de metano a CO<sub>2</sub> que ocorre no *Flare*, cerca de 0,308 Kg de CO<sub>2</sub>. Assim o Reator UASB emite quase 3 vezes mais CO<sub>2</sub> que o Lodos Ativados para remover 1 kg de DQO. A configuração

Lagoas de Estabilização também emite CO<sub>2</sub> nas 3 lagoas, mas não foi encontrada uma estimativa de emissão para esta configuração. Lembrando que nesta ETE, todo o metano foi considerado emitido para a atmosfera, visto que ainda não há sistema para captação deste em uso comercial.

A categoria Ecotoxicidade de Água Doce de Longo Termo domina os impactos, entre 74 e 88%, para a área de proteção qualidade dos ecossistemas. Grande parte, 58 a 72%, devido a concentração de alumínio remanescente no esgoto tratado. Apesar de ter sido adotada a mesma concentração de metais no esgoto tratado dos 3 sistemas, essa variação percentual ocorre devido a contribuição, menor que 5%, de outros materiais consumidos (aço, óleo diesel, por exemplo), do consumo de energia elétrica na operação e de outros contaminantes remanescentes. Importante ressaltar que estes poluentes não são devido ao tratamento do esgoto sanitário e sim característicos da qualidade do esgoto sanitário recebido para o tratamento, conforme discutido no item 5.2.2.2. Metais, e os impactos associados a estes uma ineficiência dos tratamentos biológicos avaliados. Assim, poderiam ser excluídos da ACV, de acordo com a delimitação de fronteiras adotadas.

**Figura 20** - Resultados da AICV dos 3 sistemas de tratamento de esgoto por estágio do ciclo de vida: Construção, Operação, Destinação de lodo (Dest. Lodo) e Lançamento do esgoto tratado (Lançamento). Impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: Saúde humana em DALY (esquerda) e qualidade dos ecossistemas em PDF.m<sup>2</sup>.year (à direita).



Fonte: Própria autora.

Os impactos por estágio do ciclo de vida das ETEs são apresentados na Figura 20, onde se pode confirmar as maiores contribuições como discutido acima.

O método EDIP foi usado por Høiby et al. (2008) para comparar diversas tecnologias avançadas de tratamento de esgoto sanitário a serem incluídas como pós-tratamento em ETEs, estas com a função principal de remover substâncias perigosas, como agentes patogênicos, micro poluentes e metais pesados. O filtro de areia foi identificado como a melhor alternativa (balanço de impactos adicionados pela construção e operação e ganhos ambientais) para a redução da ecotoxicidade associada ao tratamento de esgoto sanitário. Visto que a maior parte dos impactos na área de proteção Qualidade dos ecossistemas provêm da categoria ecotoxicidade de água fresca, ganhos como o obtido pela adoção da filtração em areia do esgoto tratado podem ser uma boa alternativa para reduzir os danos ambientais das ETEs avaliadas.

Lopes et al. (2020) estimaram os impactos ambientais de um sistema de tratamento de esgoto sanitário combinando Reator UASB e *Wetlands* Construídos em operação no Brasil usando o método CML. A etapa de construção e a fase de coleta de esgoto sanitário foram incluídas na avaliação. No resultado da AICV, estes obtiveram uma pequena contribuição aos danos devido aos poluentes remanescentes no lançamento do esgoto tratado. Dentre as categorias de impacto, os poluentes remanescentes considerados, matéria orgânica e os nutrientes (nitrogênio e fósforo), contribuíram significativamente apenas para a Eutrofização (próximo a 100 %) e para a Ecotoxicidade de Água Doce (menor que 15 %). Essa grande diferença em relação ao presente trabalho, menor contribuição aos danos devido aos poluentes remanescente, se deve a Lopes et al. (2020) não terem inventariado os metais presentes no esgoto sanitário bruto e tratado.

Hernández-Padilla et al. (2017) estimaram os impactos de 2 ETEs, uma com tratamento por Lodos Ativados e a outra por Lagoas de Estabilização, usando o *Impact World+* e dados consolidados de diferentes ETEs em operação na América Latina e Caribe. As categorias de impacto Mudança Climática de Longo Termo e de Curto Termo são as grandes contribuidoras para a área de proteção saúde humana. Possivelmente devido ao consumo de eletricidade no sistema de Lodos Ativados, com maior participação dos combustíveis fósseis para a geração de eletricidade e a geração de metano no sistema Lagoas de Estabilização. Diferente do presente trabalho, a Toxicidade Não Cancerígena responde por menos de 10% dos danos para a área de proteção saúde humana, possivelmente por considerarem a quantidade de metais no lodo menor, em ordem de

magnitude, do que a inventariada para o corrente trabalho. Para a área de proteção qualidade dos ecossistemas, Eutrofização de Água Doce é a grande contribuinte para ambas as ETEs, entretanto a contribuição da categoria Ecotoxicidade de Água Doce é em torno de 10 %. Apesar de considerarem as concentrações de diversos metais no esgoto tratado, diferentes para cada um dos sistemas avaliados, e na mesma ordem de magnitude que o trabalho atual, o alumínio não foi considerado. No trabalho atual, apenas o alumínio no esgoto tratado responde por 80% da contribuição da categoria Ecotoxicidade de Água Doce para os danos estimados da ETE de Lodos Ativados e por 64% dos danos da ETE Lagoas de Estabilização, ambos para a área de proteção qualidade dos ecossistemas. Tal contribuição desta categoria no presente trabalho dificulta a percepção do impacto das demais categorias, inclusive da Eutrofização de Água Doce, normalmente relacionada aos teores remanescentes de fósforo no esgoto tratado.

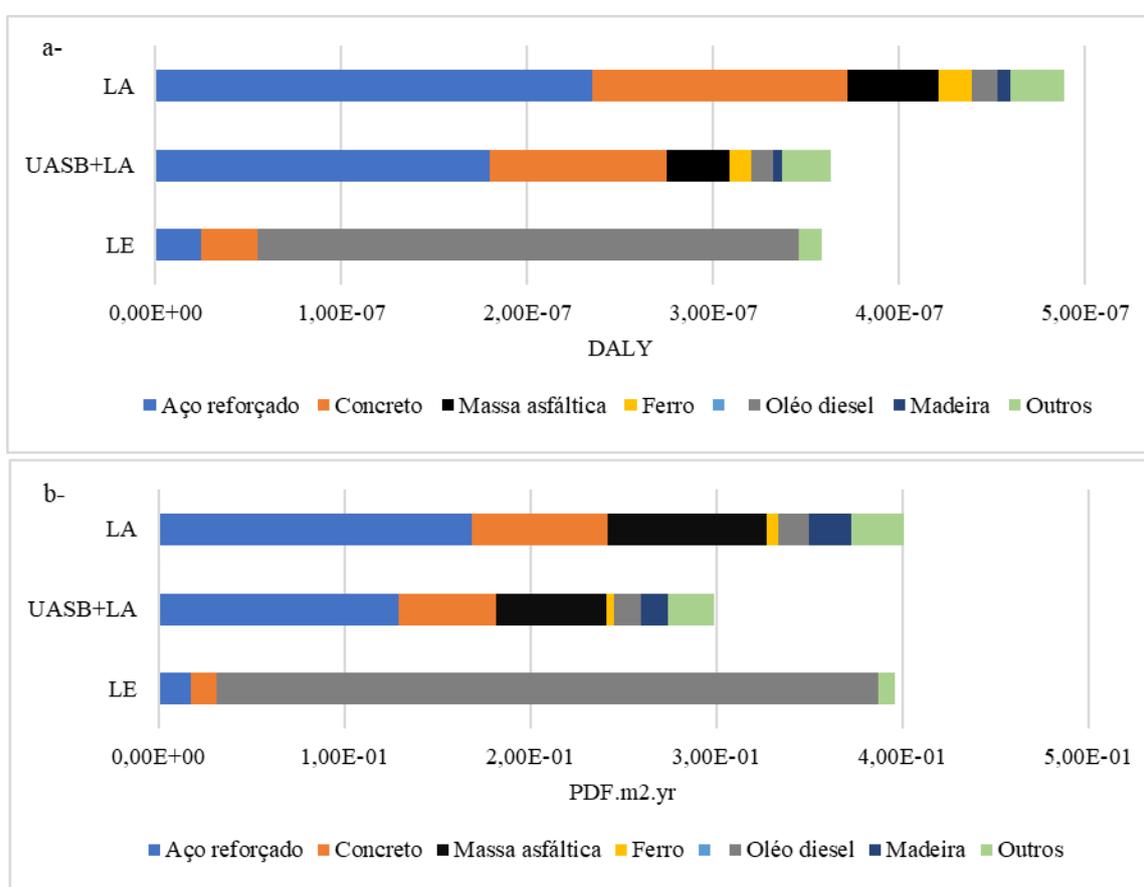
Na Figura 20, também pode ser verificado que a construção das ETEs avaliadas apresenta contribuição relevante para os danos do ciclo de vida, variando de 10 a 22% para a área de proteção saúde humana e de 5 a 7% para a qualidade dos ecossistemas. Para a construção da ETE Lagoas de Estabilização, o óleo diesel é o material de maior contribuição para as 2 áreas de proteção, respondendo por 84% dos impactos da construção para a saúde humana e por 92% para a qualidade dos ecossistemas. Para as ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados, o aço reforçado é o material de maior contribuição (maior que 40% para ambas as áreas de proteção), seguidos do concreto (em torno de 26% para a saúde humana e acima de 13% para a qualidade dos ecossistemas) e da massa asfáltica usada na impermeabilização dos tanques e sedimentadores (em torno de 10% e de 21% para as áreas de proteção saúde humana e qualidade dos ecossistemas, respectivamente).

No ciclo de vida do aço reforçado, a fabricação do ferro é o maior contribuinte para a Mudança Climática de Longo Termo, e no ciclo de vida do cimento, a fabricação do *clinker*. Para a categoria Ecotoxicidade de Água Doce de Longo Termo, a maior contribuição é devido aos rejeitos da mineração de chumbo, chumbo este requerido na fabricação de equipamentos do processo de produção de cimento e na produção de molibdenite, um dos componentes do aço.

As contribuições para os danos dos principais materiais usados na construção dos 3 sistemas de tratamento são apresentadas na Figura 21. Esses mesmos materiais, aço reforçado, concreto, massa asfáltica e o óleo diesel, esse último apenas para o sistema

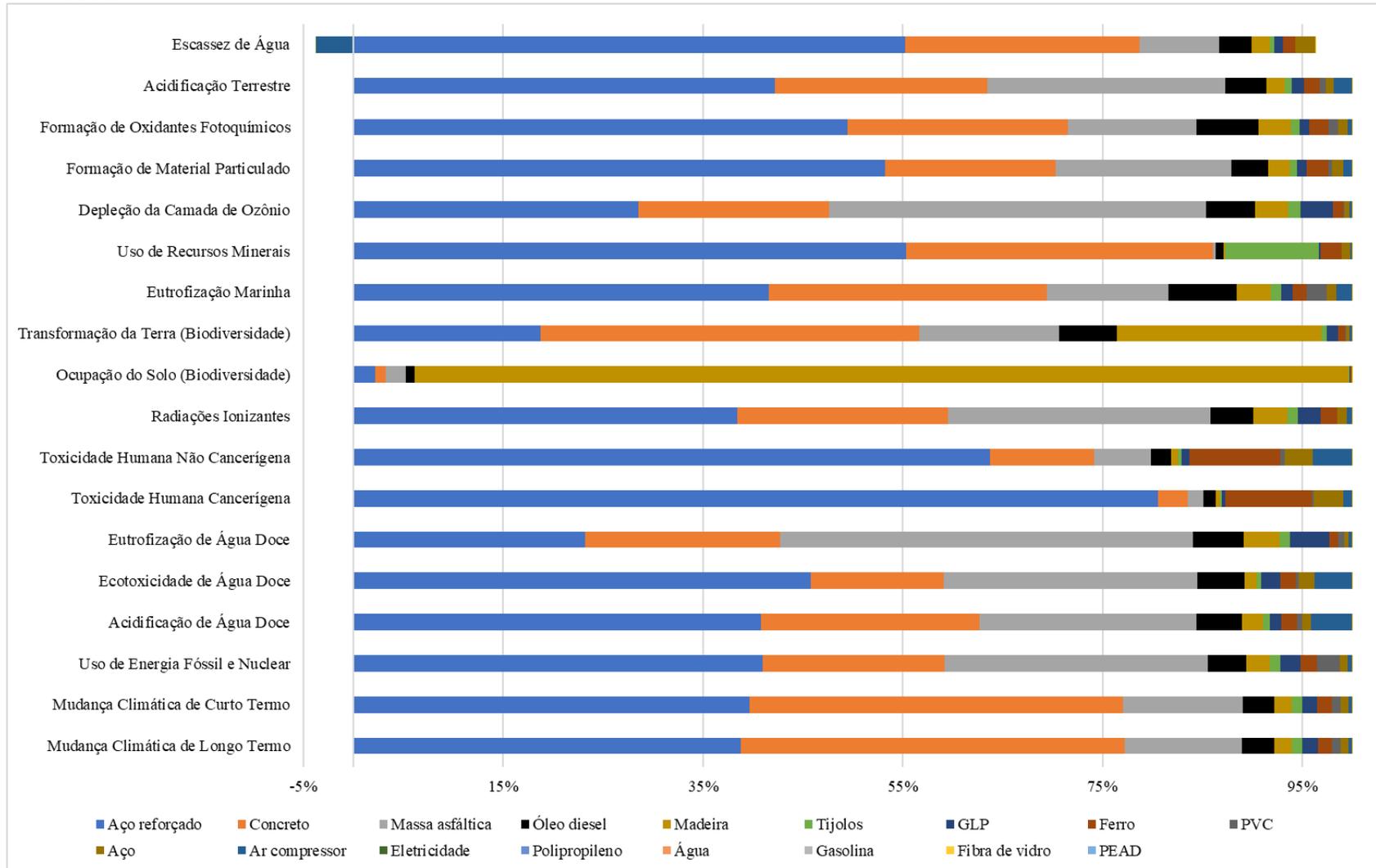
Lagoas de Estabilização, são os grandes contribuintes da maioria das categorias de impacto intermediárias, conforme pode ser observado nas Figura 22 (Lodos Ativados), 23 (Reator UASB + Lodos Ativados) e 24 (Lagoas de Estabilização). A parte negativa da barra de contribuição para a categoria Escassez de Água se deve ao banco de dados Ecoinvent<sup>®</sup>, usado no ICV, considerar que alguns subprocessos da fabricação do aerador, usado nos sistemas Lodos Ativados e Reator UASB + Lodos Ativados, produzem água.

**Figura 21-** Contribuição dos principais materiais de construção para os impactos da construção dos 3 sistemas. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior).



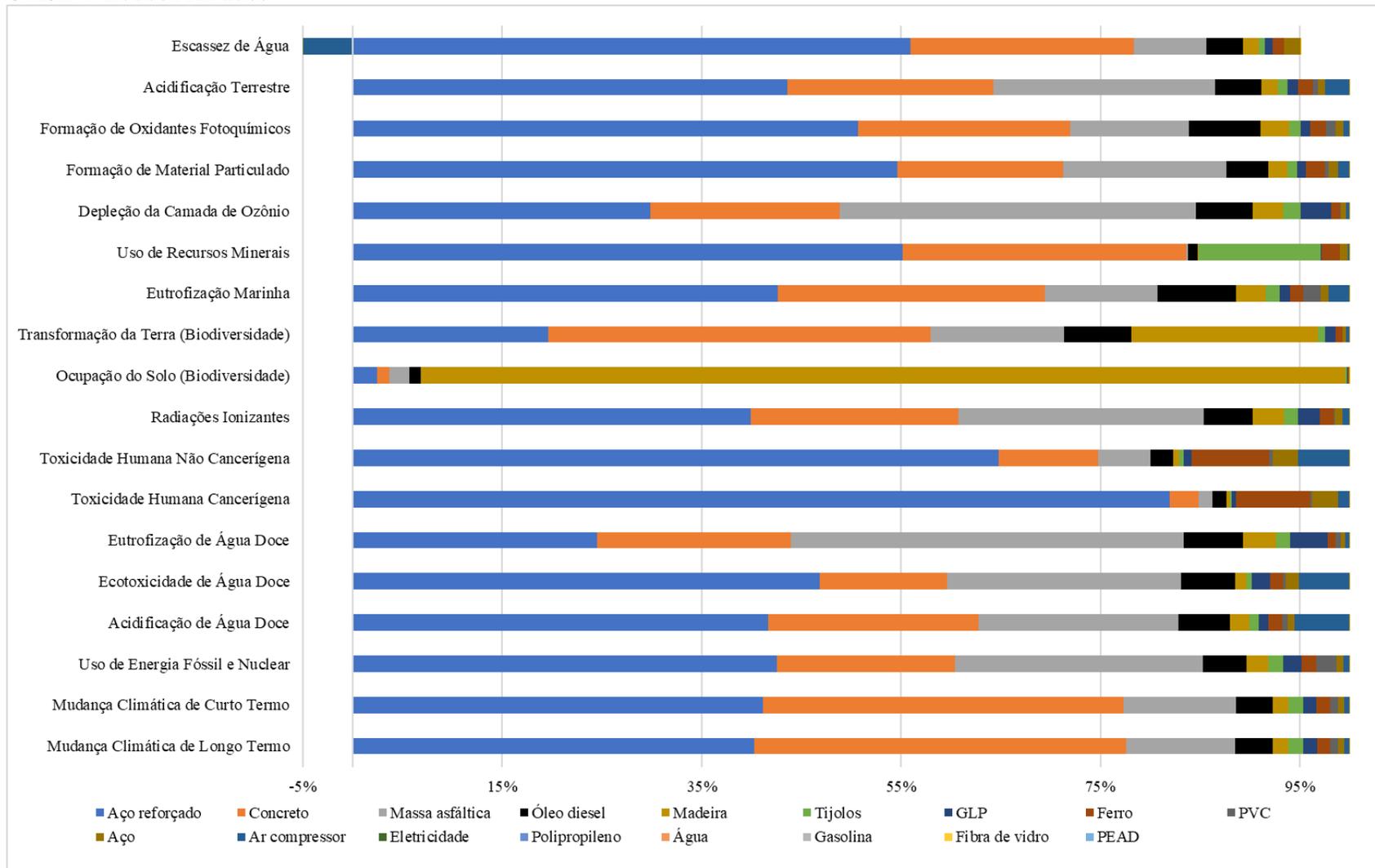
Fonte: Própria autora.

**Figura 22** – Contribuição dos materiais de construção para as categorias de impacto intermediárias da etapa de construção para o Sistema Lodos Ativados.



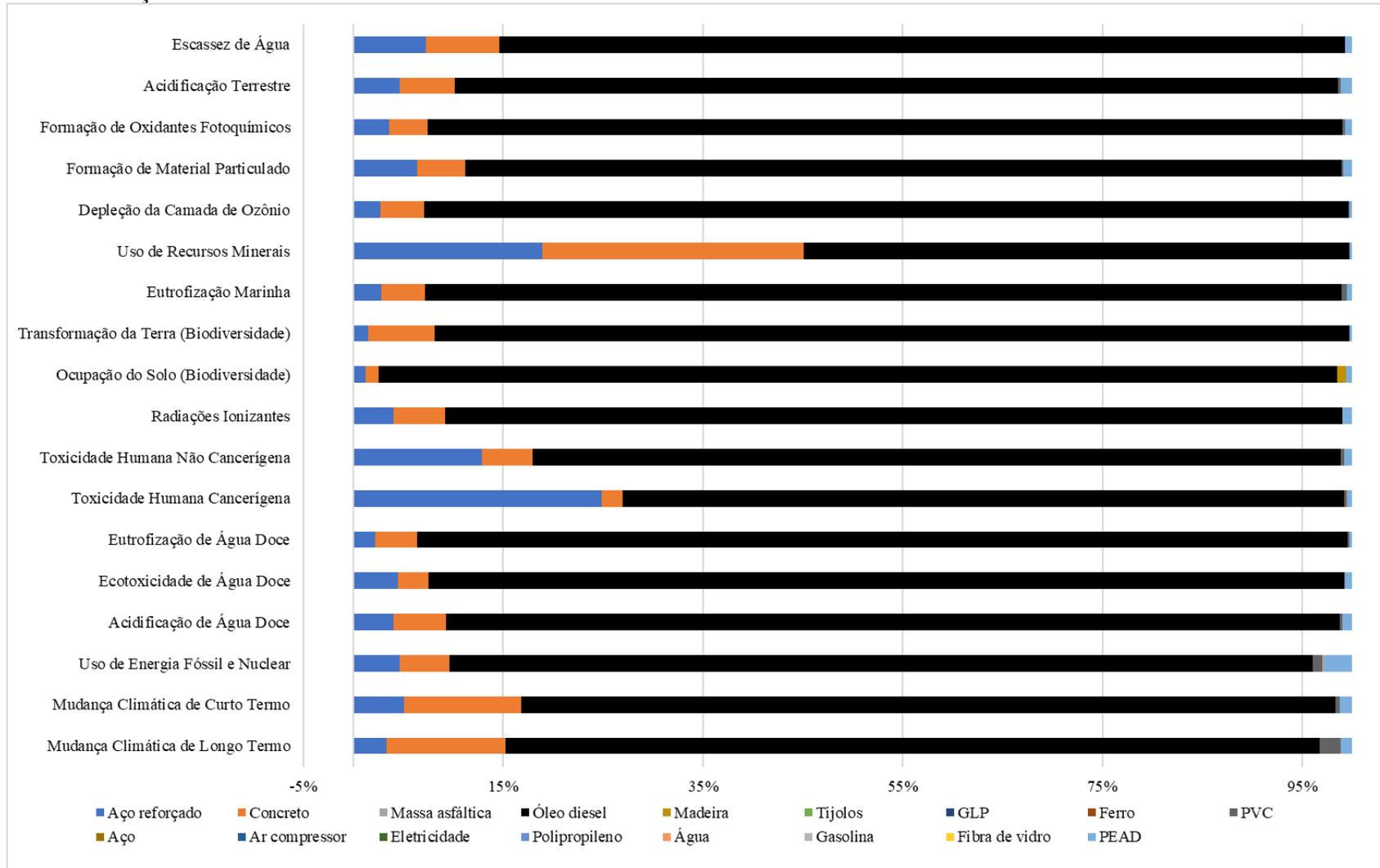
Fonte: Própria autora.

**Figura 23** – Contribuição dos materiais de construção para as categorias de impacto intermediárias da etapa de construção para o Sistema Reator UASB + Lodos Ativados



Fonte: Própria autora.

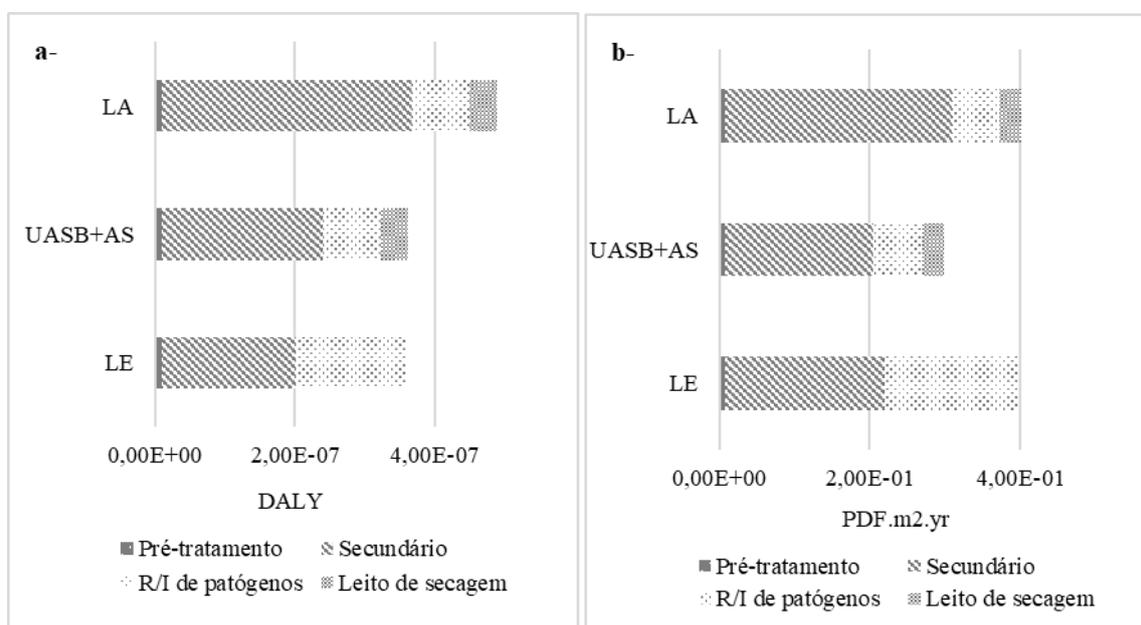
**Figura 24** – Contribuição dos materiais de construção para as categorias de impacto intermediárias da etapa de construção para o Sistema Lagoas de Estabilização.



Fonte: Própria autora.

Em relação a construção das etapas do tratamento, como pode ser observado na Figura 25, o tratamento secundário tem maior impacto para as 3 ETEs. Entretanto para a ETE Lagoas de Estabilização, o tratamento secundário (lagoa anaeróbia e lagoa facultativa) e a lagoa de maturação, com a função principal de remover agentes patogênicos, têm soma de impactos praticamente iguais.

**Figura 25** – Impactos ambientais por estágio do tratamento de esgoto sanitário: Pré-tratamento, Tratamento secundário (Secundário), Remoção/Inativação de agentes patogênicos (R/I de patógenos e Leito de Secagem). Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita).

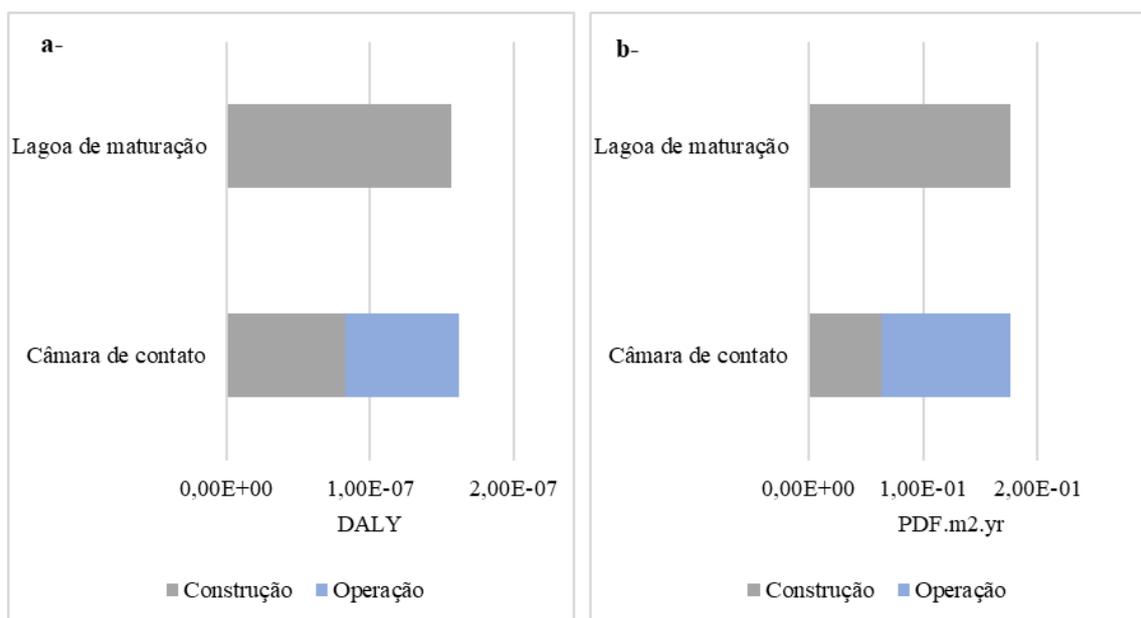


Fonte: Própria autora.

A partir dessa constatação, foi feito uma avaliação de substituir a lagoa de maturação por uma câmara de contato com consumo de hipoclorito de sódio durante toda a fase de operação, assim como adotado nas ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados. Para tal, foi necessário adicionar os impactos ambientais da produção e transporte do hipoclorito aos impactos da construção da câmara de contato. Deste estudo conclui-se que apesar da construção da câmara de contato ter impactos ambientais menores do que a construção da lagoa de maturação, a adição dos impactos relativos à produção externa e o transporte do hipoclorito de sódio faz com que os impactos quase se igualem, Figura 26. Essa pequena diferença entre as alternativas para remoção/inativação de agentes patogênicos mostra que, numa perspectiva do Ciclo de Vida, não seria vantajoso trocar a lagoa de maturação pela câmara de contato com consumo de hipoclorito. Entretanto, caso a área disponível para a instalação do sistema

Lagoa de Estabilização seja parcialmente limitada, essa troca pode ser interessante, visto que a lagoa de maturação demanda 50% de toda a área do sistema.

**Figura 26** - Comparação da performance ambiental de 2 formas de remoção/inativação de agentes patogênicos, incluindo as etapas de construção e a operação. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita).



Fonte: Própria autora.

No trabalho de Hernández-Padilla et al. (2017), que estimou e comparou os impactos ambientais de ETEs Lodos Ativados com ETEs Lagoas de Estabilização, a única entrada de significativa contribuição da construção para o ciclo de vida das ETEs, foi a produção de *clinker* (etapa do processo de fabricação de cimento), com maior relevância para a Mudança Climática de Longo Termo no sistema Lagoas de Estabilização. Os autores destes utilizaram o inventário de construção feito por Güereca et al. (2011). A construção desta ETE, LE, como anteriormente discutido na análise do inventário de construção, consumiria bem mais concreto e muito menos diesel do que o levantado no corrente trabalho, apresentando diferente perfil de contribuição dos materiais para os danos.

No trabalho de Resende, Rodrigues (2015) foram comparados os impactos do ciclo de vida de duas ETEs, uma apenas com Lodos Ativados e a outra combinando o Reator UASB ao Lodos Ativados, a etapa de construção foi considerada, mas não a de destinação do lodo e nem a de lançamento do esgoto tratado. Foi usado o método CML

com levantamento dos impactos intermediários. Assim como no corrente trabalho, foram estimados danos ambientais menores em todas as categorias avaliadas para o sistema Reator UASB + Lodos Ativados, exceto na Mudança Climática de Curto Termo. Apesar de que neste trabalho, Resende, Rodrigues (2015), a construção do sistema Reator UASB + Lodos Ativados consumir uma quantidade maior de materiais de construção do que o Lodos Ativados, o consumo de eletricidade na operação de ambos os sistemas, menor no Reator UASB + Lodos Ativados, foi o item de maior contribuição, o que deve ter tornado a etapa de construção menos relevante para o resultado total.

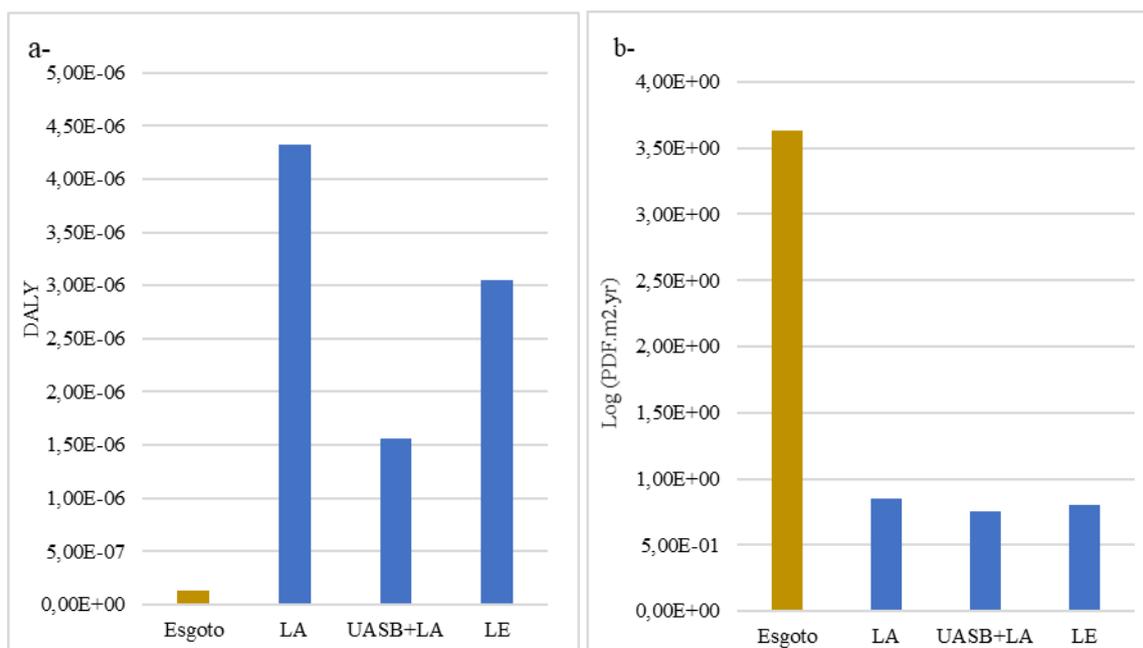
Aos comparar os danos quantificados das 3 ETEs com os possíveis danos do lançamento de esgoto sanitário sem tratamento (Figura 27), nota-se um incremento nos danos para a área de proteção à saúde humana, mas com uma redução maior nos danos para a área de proteção qualidade dos ecossistemas. Isso acontece porque a produção de materiais de consumo e de construção, incluindo a energia elétrica, além das emissões gasosas dos processos causam impactos significativos a saúde humana, principalmente nas categorias relacionadas a Mudança Climática. Enquanto os acréscimos devido a esses processos são poucos significativos para a área de proteção qualidade dos ecossistemas, na qual os poluentes remanescentes no lançamento do esgoto tratado são mais danosos, ainda que reduzidos à uma fração menor que 0,2% do valor dos impactos do esgoto sanitário sem tratamento. Na Tabela 20, estão apresentados os valores obtidos para cada categoria de impacto e para cada sistema para serem comparados aos valores do esgoto sanitário sem tratamento. A grande diferença entre os valores, principalmente para a área de proteção qualidades dos ecossistemas, dificulta a visualização dessas na forma de gráfico, sendo necessário a utilização de escala logarítmica na Figura 27 para a apresentação dos danos ambientais para a área de proteção Qualidade dos ecossistemas.

Os maiores incrementos aos danos à saúde humana ocorrem nas categorias Mudanças Climáticas de Longo e de Curto Prazo, e nas categorias Toxicidade de Longo Termo Cancerígena e Não Cancerígena. Para a qualidade dos ecossistemas, as maiores reduções acontecem nas categorias Eutrofização Marinha e de Água Doce e Ecotoxicidade de Água Doce de Longo e de Curto Termo.

Estes resultados, acréscimo na área de proteção saúde humana e decréscimo na qualidade dos ecossistemas, estão dentro do esperado para sistemas de tratamento de esgoto em comparação ao lançamento sem tratamento. Entretanto, o acréscimo na saúde humana poderia ser minimizado ao considerar as emissões atmosféricas de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O

que ocorrem devido ao lançamento de esgoto sem tratamento. Estimativa essa aplicada por Godin, Bouchard, Vanrolleghem (2012) para avaliar os benefícios ambientais de sistemas de tratamento de esgoto.

**Figura 27** - Comparação da performance ambiental das 3 ETEs com o lançamento de esgoto sem tratamento. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de  $1\text{m}^3$  de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m<sup>2</sup>.year em escala logarítmica (direita).



Fonte: Própria autora.

**Tabela 20** – Impactos ambientais das 3 ETEs em comparação aos impactos do lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Os valores são abertos em categorias para cada uma das áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior).

	<b>Esgoto sanitário</b>	<b>LA</b>	<b>UASB+LA</b>	<b>LE</b>
<b>Saúde Humana (DALY)</b>	1,32E-07	4,33E-06	1,56E-06	3,05E-06
Mudança Climática de Longo Termo	0,00E+00	6,21E-07	4,98E-07	4,89E-07
Mudança Climática de Curto Termo	0,00E+00	1,82E-07	1,42E-07	8,14E-08
Toxicidade Humana Cancerígena de Longo Termo	4,75E-10	1,36E-07	2,92E-08	9,89E-08
Toxicidade Humana Cancerígena de Curto Termo	5,31E-08	1,97E-07	7,81E-08	1,16E-07
Toxicidade Humana Não Cancerígena de Longo Termo	1,17E-08	1,73E-06	3,92E-07	1,25E-06
Toxicidade Humana Não Cancerígena de Curto Termo	6,67E-08	1,08E-06	2,49E-07	7,99E-07
Radiação Ionizante	0,00E+00	3,80E-10	3,14E-10	1,32E-10
Depleção da Camada de Ozônio	0,00E+00	7,46E-11	6,05E-11	2,74E-11
Formação de Material Particulado	0,00E+00	3,16E-07	1,22E-07	1,90E-07
Formação de Oxidante Fotoquímico	0,00E+00	3,58E-11	2,16E-11	2,93E-11
Disponibilidade de Água	0,00E+00	6,56E-08	5,47E-08	2,17E-08
<b>Qualidade Dos Ecossistemas (PDF.m2.year)</b>	4,25E+03	7,05E+00	5,70E+00	6,37E+00
Mudança Climática de Longo Termo	0,00E+00	1,39E-01	1,12E-01	1,16E-01
Mudança Climática de Curto Termo	-	3,94E-02	3,07E-02	1,76E-02
Acidificação de Água Doce	-	3,64E-03	1,25E-03	2,26E-03
Ecotoxicidade de Água Doce de Longo Termo	4,25E+03	5,19E+00	4,99E+00	4,89E+00
Ecotoxicidade de Água Doce de Curto Termo	6,10E-04	1,37E+00	2,86E-01	1,01E+00
Eutrofização de Água Doce	3,94E-02	1,11E-02	2,08E-02	2,44E-02
Radiação Ionizante	-	1,73E-10	1,33E-10	8,06E-11
Ocupação de Terra (Biodiversidade)	-	1,82E-02	1,20E-02	3,81E-03
Transformação da Terra (Biodiversidade)	-	1,92E-02	1,51E-02	1,04E-02
Acidificação Marinha de Longo Prazo	-	2,88E-02	2,20E-02	1,37E-02
Acidificação Marinha De Curto Prazo	-	3,13E-03	2,39E-03	1,49E-03
Eutrofização Marinha	4,20E-01	1,66E-01	1,93E-01	2,45E-01
Acidificação Terrestre	-	5,62E-02	1,65E-02	3,55E-02
Água Termicamente Poluída	-	2,23E-09	5,92E-10	1,31E-09
Disponibilidade de Água (Ecossistema Água Doce)	-	1,23E-07	1,01E-07	4,96E-08
Disponibilidade de Água (Ecossistema Terrestre)	-	2,80E-06	2,19E-06	1,16E-06

Fonte: Própria autora.

## 6.3. Interpretação

### 6.3.1. Análises de Sensibilidade

As análises de sensibilidade foram definidas após a avaliação de impacto dos sistemas. Foram avaliadas o impacto das decisões tomadas para as entradas/saídas com maior contribuição para os resultados (“a” até “c”) e para o método de caracterização adotado (“d”):

- a. Análise de sensibilidade da forma de destinação do lodo: com a alternativa de utilização como biofertilizante em substituição a produção do sulfato de amônia;
- b. Análise de sensibilidade do provedor de energia elétrica: alteração do provedor para a opção Resto do mundo (*market - RoW*) em comparação a alternativa de fornecimento brasileira adotada (*market - BR*);
- c. Análise de sensibilidade da quantidade de energia elétrica consumida: inclusão de dois cenários para cada sistema com as quantidades mínimas e máximas relatadas no questionário;
- d. Regionalização do método de caracterização: Uso da versão Default do método *Impact World+*;
- e. Método de caracterização: Quantificação dos impactos ambientais das 3 configurações de tratamento e do esgoto sanitário sem tratar pelo uso do *ReCiPe 2016*.

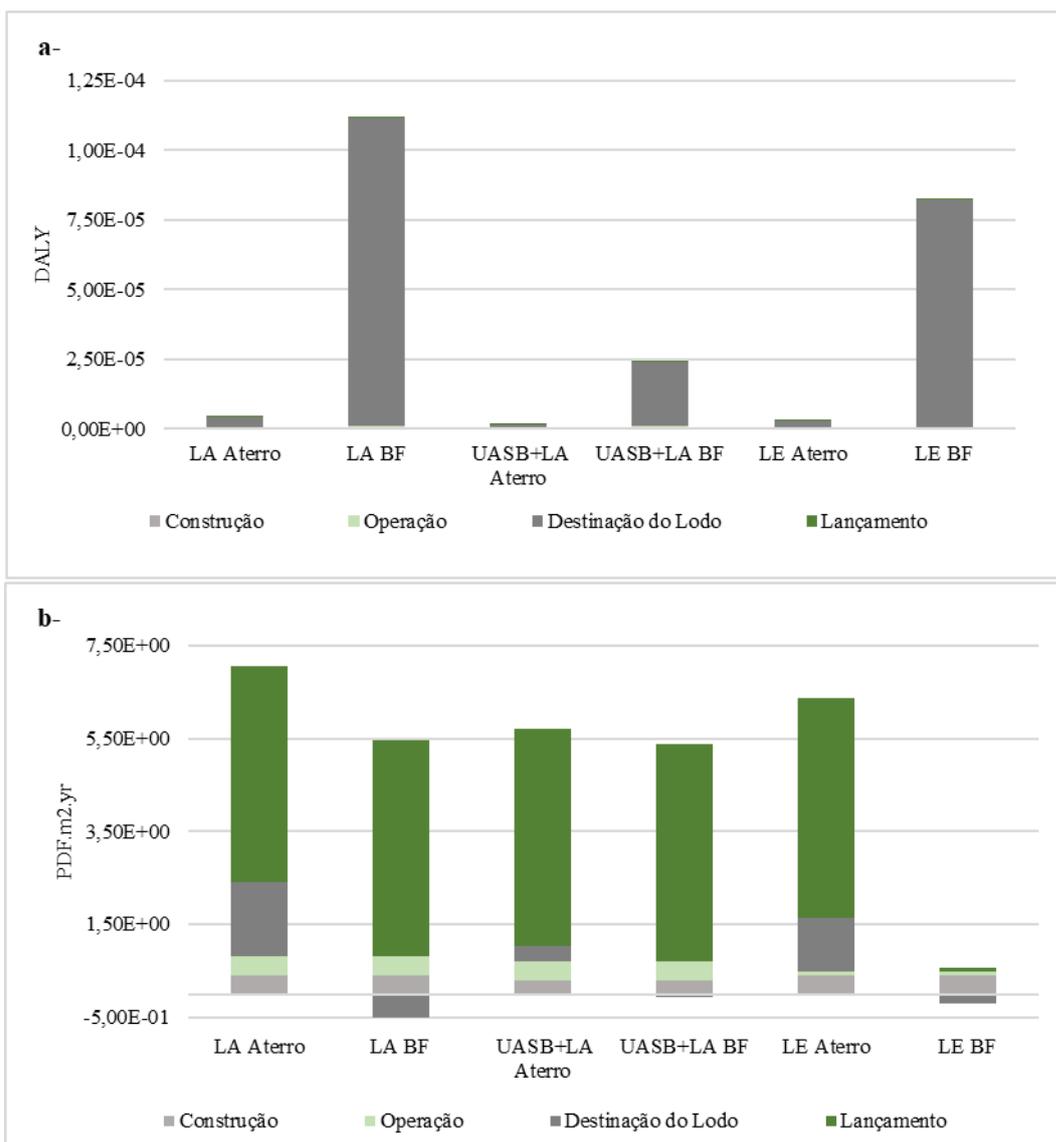
As análises de sensibilidade “b” e “c” foram realizadas devido a entrada de energia elétrica ser o *input* do inventário de maior contribuição que apresenta alguma variabilidade para os 3 sistemas.

#### a - Análise de sensibilidade da forma de destinação do lodo

O uso do lodo gerado nas 3 ETEs como biofertilizante em substituição a produção e transporte do fertilizante sulfato de amônio gera mais impactos na área de proteção Saúde humana e reduz os impactos para a área de proteção Qualidade dos ecossistemas, como pode ser visto na Figura 28. Nesta última AP, Qualidades dos ecossistemas, há uma redução dos danos proporcional à geração de lodo pela ETE, maior nas ETEs Lodos Ativados e Lagoas de Estabilização. Dado que os ganhos ambientais com a prevenção da produção do fertilizante sulfato de amônio aumenta com a quantidade de lodo gerado e reciclado como fertilizante. Apesar da redução dos danos totais ou a manutenção dos mesmos valores na maioria das categorias, o uso de cal como estabilizador do lodo

adiciona impactos aos sistemas na categoria Disponibilidade de Água (Ecossistema Terrestre).

**Figura 28** - Comparação da performance ambiental de 2 formas de destinação do lodo: Aterro sanitário (Aterro) e uso como biofertilizante (BF) para os 3 STEs. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior).



Fonte: Própria autora.

Ao considerar a utilização do lodo como biofertilizante, há uma alteração do uso do solo que deixa de ser solo de uso geral e passa a ser solo agriculturável. Essa é a principal razão para o aumento dos impactos ambientais do cenário que considera o uso do lodo como biofertilizante para a AP Saúde humana. Os metais mercúrio e chumbo são os dois componentes do lodo que apresentam maior contribuição para esta área de

proteção nas categorias de Toxicidade. Nesse caso, não porque há um aumento na incorporação desses metais, visto que foram usadas as mesmas concentrações e espécies químicas do que nas avaliações originais, e sim por uma alteração no fator de caracterização para consolidação destes como impacto à saúde humana. Possivelmente devido ao aumento da exposição humana a estes compostos via solo agriculturável, visto que o destino (solo) não se altera e os efeitos são decorrentes da concentração aos que seres humanos são expostos.

No *Impact World+*, os fatores de impacto do mercúrio e do chumbo podem variar de 2 a 3 ordens de magnitude de acordo com o uso do solo (Tabela 21). Assim, esses 2 metais passam a ter as maiores contribuições para os danos para a área de proteção saúde humana (entre 65 e 68% devido ao mercúrio e 17% devido ao chumbo), dentro das categorias Toxicidade Humana Não Cancerígena de Longo (3/4 da contribuição) e de Curto Prazo. Já o arsênio, que era o metal mais nocivo para o solo de uso geral, tem sua nocividade no solo agriculturável reduzida. Esse é um caso do aumento da incerteza dos impactos quando se considera problemas e áreas de proteção e não as categorias intermediárias, visto que se assume que maior quantidade destes metais será ingerido por humanos ao mudar o uso do solo.

**Tabela 21** - Fatores de impacto adotados pelo método *Impact World+* de acordo com o uso do solo (agricultura ou geral) para os metais de maiores contribuição para a área de proteção saúde humana (mercúrio e chumbo) em comparação aos fatores de impacto para a Ecotoxicidade de Água Doce e para o arsênio.

Valores em DALY.Kg<sup>-1</sup> ou PDF.m<sup>2</sup>.yr.Kg<sup>-1</sup>.

Uso do Solo	Mercúrio		Chumbo		Arsênio	
	Agricultura	Geral	Agricultura	Geral	Agricultura	Geral
Ecotoxicidade de Água Doce	9,41E+00	2,75E+00	2,46E-01	3,80E-02	8,81E+00	4,95E-01
Toxicidade Humana Não Cancerígena de Curto Termo	8,75E+00	3,06E-02	9,90E-02	6,48E-05	5,88E-02	2,15E-02
Toxicidade Humana Não Cancerígena de Longo Termo	2,91E+00	3,60E-03	4,58E-02	1,56E-05	5,51E-02	1,47E-02

Fonte: Própria autora.

Gallego et al. (2008), usando o CML 2000, estimaram os impactos ambientais de 13 ETEs em operação na Europa. De maneira semelhante ao trabalho atual, encontrou que os metais incorporados ao solo, devido ao uso de lodo na agricultura, são os grandes contribuintes para os impactos da categoria relacionada a Toxicidade Terrestre. Entretanto, o cromo era o segundo maior contribuinte depois do mercúrio, no corrente trabalho é o chumbo.

Diferente do que ocorreu no trabalho de Niero et al. (2014) com a adoção do método ReCiPe. Este método atribui as maiores contribuições à categoria Toxicidade Humana à geração de energia a partir de combustíveis fósseis e pela produção de cloreto férrico em segundo lugar. Já o uso de lodo na agricultura reduziu os impactos nesta categoria, pela prevenção de descarte de manganês e arsênio na água durante a produção do fertilizante substituído pelo lodo. As categorias Ecotoxicidade de Água Doce e Ecotoxicidade Marinha foram afetadas de maneira semelhante a Toxicidade Humana. No entanto, a Toxicidade Terrestre teve grande contribuição da incorporação dos metais cobre e zinco ao solo devido ao uso do lodo na agricultura.

No trabalho Do Amaral et al. (2018), foram estimados os impactos ambientais da destinação de lodo estabilizado de Reator UASB no Brasil e comparados com as alternativas (1- secagem e aplicação em solo de uso agrícola, 2- incineração e aplicação das cinzas em solo de uso agrícola, 3- disposição em aterro). No cenário em uso, o lodo era estabilizado e aplicado em solo agrícola sendo responsável por 99% dos impactos ambientais relativos à Toxicidade Humana Não Cancerígena, assim como no trabalho atual, entretanto 98% dessa toxicidade era devido ao zinco. Foram usadas concentrações de metais diferentes: A concentração de zinco era 10 vezes superior que a do corrente trabalho, a concentração de chumbo apresentou a mesma ordem de magnitude e a concentração de mercúrio apresentou uma ordem de magnitude acima. Além disso, foi usado o ReCiPe 2016 com a caracterização intermediária com apresentação do impacto em kg of 1,4DBeq, enquanto no corrente trabalho usamos o *Impact World+* específico para América Latina. Todas as alternativas avaliadas para gerenciamento do lodo reduziram os impactos das diversas categorias de Toxicidade em ao menos 50%, com redução de quase 100% na categoria Toxicidade Humana Não Cancerígena. Visto que obtivemos os resultado intermediário em Unidades Tóxicas Comparativas (CTUh), não podemos fazer uma comparação aprofundada dos dois trabalhos.

No trabalho de Xu, Chen, Hong (2014) foram comparadas diversas alternativas de tratamento e destinação de lodo com a China como local e usando o ReCiPe. Diferente do presente trabalho que não considerou a geração de eletricidade a partir do biogás produzido no aterro, o aterramento do lodo com geração de eletricidade tem as categorias Toxicidade Terrestre e as Ecotoxicidades Marinha e de Água Doce compensadas por evitar a produção de eletricidade, possivelmente a base de combustíveis fósseis. Compensação essa em relação à destinação agrícola do lodo. Estas mesmas vantagens são relacionadas a incineração do lodo desidratado, nesse caso com maior produção energética do que no aterro, o que o torna mais vantajoso. A digestão anaeróbia do lodo com geração de energia é recomendada para todas as destinações avaliadas (aterramento, fertilizante e incineração).

No trabalho de Arashiro et al. (2018), que avaliou o uso de algas do tratamento de esgoto sanitário como biofertilizante, uma tamanha toxicidade não foi estimada. Possivelmente por usarem as concentrações reais obtidas que são menores em uma ordem de magnitude dos valores que adotamos proveniente de referência bibliográfica de estudos realizados no Brasil. Ademais, tanto as algas podem absorver menos metais do que os micro-organismos dos tratamentos convencionais, quanto o esgoto sanitário brasileiro avaliado pode ter maior concentração de metais que seriam incorporados pelo lodo. Importante reforçar que as concentrações de mercúrio e chumbo adotadas no presente trabalho estão abaixo da especificação para biosólido classe I de acordo com a Resolução CONAMA 375 sendo aceito tal destino (BRASIL, 2006), da mesma maneira que no trabalho de Nascimento et al. (2020). Além disso, nesse último, que recomenda o uso do lodo como biosólido, o mercúrio não foi quantificado.

Entretanto, a partir dessa primeira análise de sensibilidade, podemos concluir que usar o lodo como biofertilizante não é uma alternativa para a redução dos danos ambientais do tratamento de esgoto sanitário, devido ao grande incremento em toxicidade humana numa visão do Ciclo de Vida. O aterramento do lodo com recuperação do biogás para produção de energia associado ou não a digestão anaeróbia do lodo parecem ser alternativas para compensar os impactos ambientais da destinação de lodo em aterro.

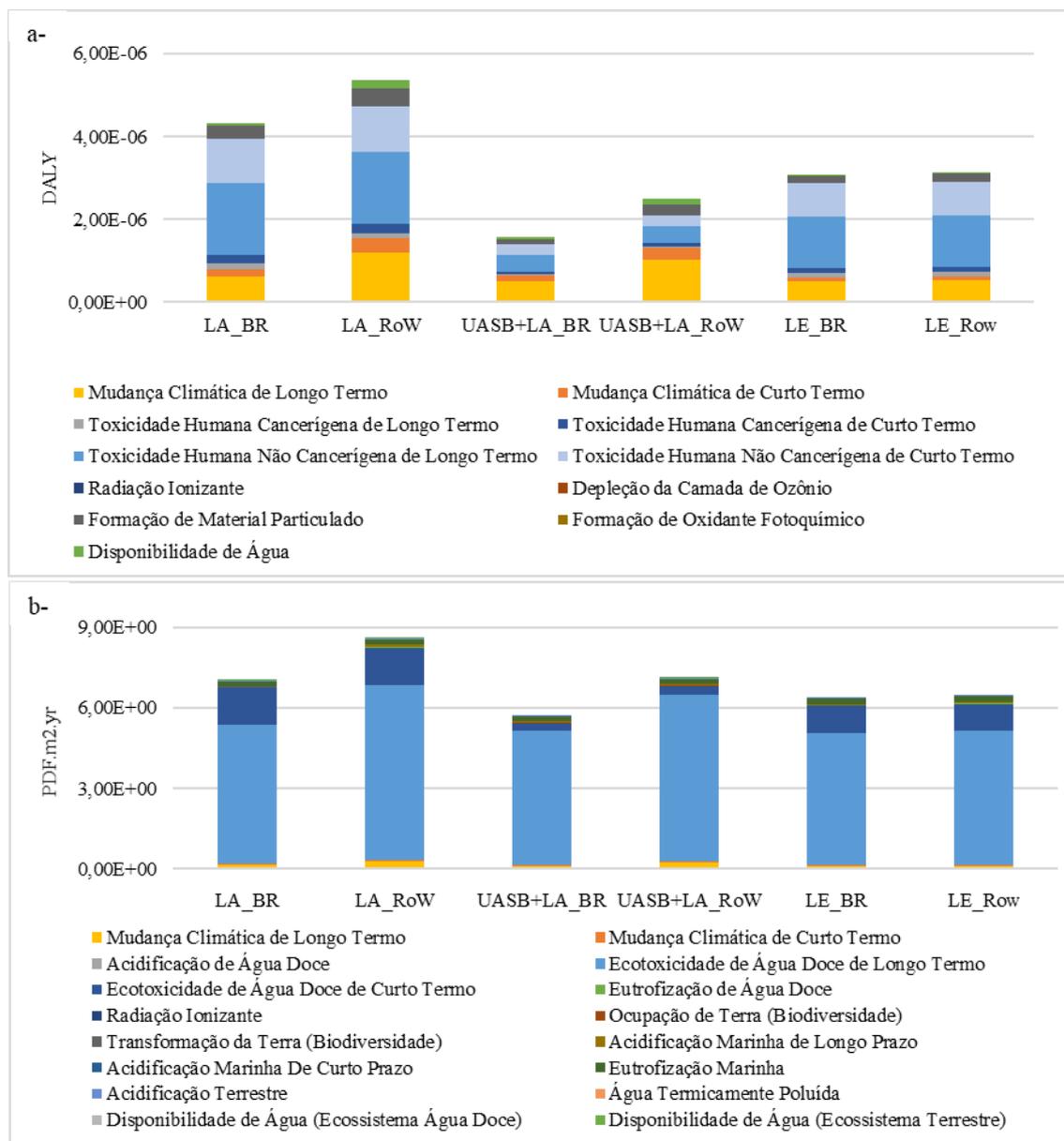
#### b- Análise de sensibilidade do provedor de energia elétrica

De acordos com dados de 2017 encontrados no Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019 (BRASIL, 2020b), a energia elétrica no Brasil provém em grande parte de fontes renováveis (82,3%), sendo a maior parte hidroeleticidade (62,9%). Situação completamente inversa ao restante do mundo na qual mais de 75% da eletricidade é obtida a partir de fontes não renováveis, sendo carvão a maior fonte mundial (38,5%). Associado ao fato de que o consumo de energia elétrica é um dos consumos de maior impacto nos sistemas Lodos Ativados e Reator UASB + Lodos Ativados, foi valido verificar o impacto no resultado associado a procedência da energia elétrica. Foi encontrado que a utilização de energia elétrica proveniente do mercado global, com maior participação das fontes não renováveis, aumenta a quantidade de danos ao meio ambiente para as duas áreas de proteção para as 3 ETEs, mas com menor diferença para a Lagoas de Estabilização que consome bem menos eletricidade que os outros dois sistemas (Figura 29).

Esses incrementos ocorrem, em grande parte, nas categorias Mudança Climática de Longo (56%) e de Curto Prazo (entre 14 e 16%) e Formação de Material Particulado (13 a 14%) para a área de proteção saúde humana, categorias influenciadas pela queima de combustíveis fósseis. Essas também são as categorias de maior contribuição para os impactos da energia elétrica global. No caso da energia elétrica brasileira, a maior contribuição é devido a categoria de impacto Disponibilidade de Água, devido ao predomínio da hidroeleticidade. Essa comparação pode ser observada na Figura 30.

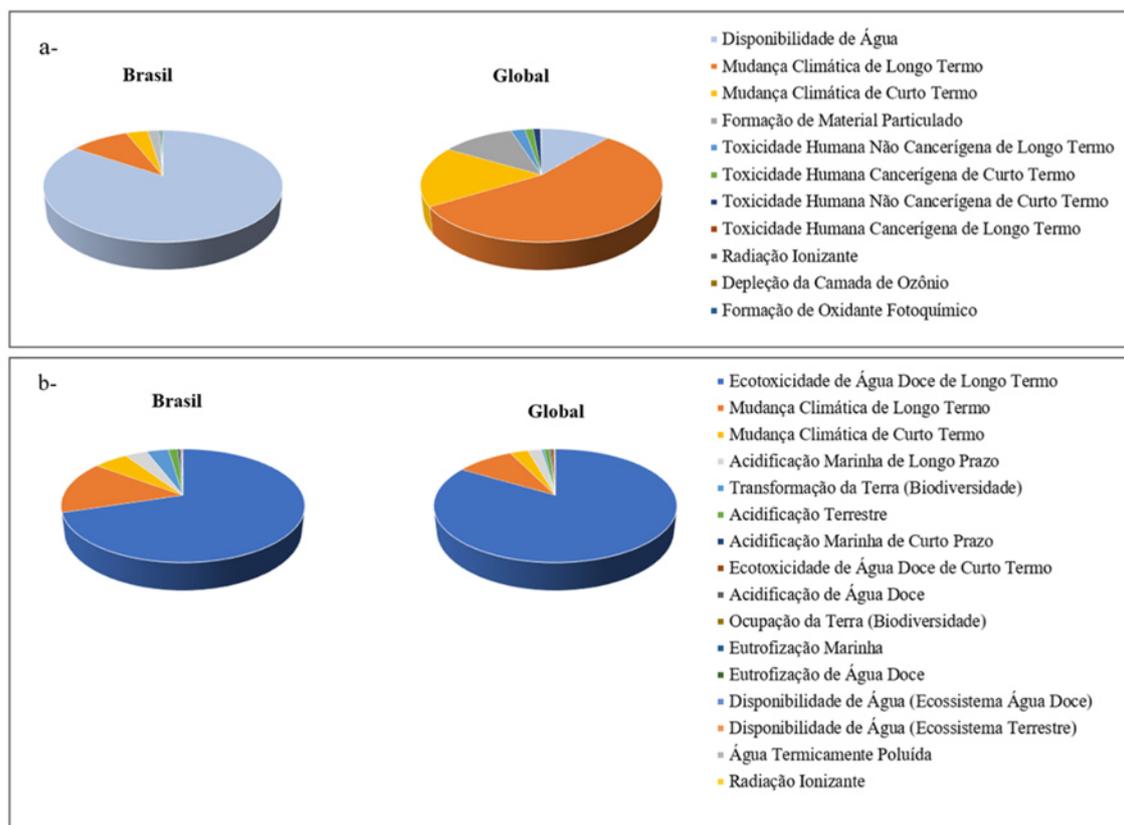
Para a área de proteção qualidade dos ecossistemas, os maiores incrementos de danos ocorrem na categoria de impacto Ecotoxicidade de Água Doce. Esta também é a categoria que mais contribui com os impactos ambientais de ambas as energias elétricas (84% para a global e 70% para a brasileira), como pode ser observado na Figura 26. Esses danos têm origem nos ciclos de vida de obtenção de energia de combustíveis fósseis (lignite e carvão, principalmente). A contribuição da Ecotoxicidade de Água Doce é menor para a energia elétrica brasileira que provém menos de combustíveis fósseis, mesmo assim, essa contribuição não é diretamente proporcional ao percentual de uso de combustíveis fósseis, ou a diferença seria bem maior.

**Figura 29** - Comparação da performance ambiental ao utilizar outro provedor de energia elétrica: brasileira (BR) e global (RoW)), para os 3 sistemas. Os impactos ambientais são apresentados para o tratamento de 1m<sup>3</sup> de esgoto para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior).



Fonte: Própria autora

**Figura 30** - Comparação das contribuições das categorias de impacto para a obtenção de energia elétrica de acordo com o provedor: Brasil ou Global. As contribuições são apresentadas para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (superior), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (inferior).



Fonte: Própria autora

Gallego et al. (2008) consideraram algumas diferentes matrizes energéticas europeias nos impactos ambientais de ETE com o maior consumo de eletricidade (dentro o grupo avaliado) e, de maneira semelhante ao corrente trabalho, encontrou uma redução na contribuição da categoria Aquecimento Global com o aumento da participação de fontes renováveis. Semelhança esperada, visto que os diferentes métodos de quantificação dos impactos ambientais relacionados a Mudança Climática ou Aquecimento Global seguem a recomendação do IPCC (COMMISSION; JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY, 2010).

No trabalho de Hernández-Padilla et al. (2017), no qual foram estimados e comparados os impactos ambientais de ETEs Lodos Ativadas e Lagoas de Estabilização, também foram avaliados os impactos ambientais ao se considerar a matriz energética de cada país Latino-Americano e Caribenho, dentre eles o Brasil. Diferente do presente trabalho, ao usar a matriz elétrica brasileira, a ETE Lagoas de Estabilização causaria mais

danos do que a ETE Lodos Ativados para ambas as áreas de proteção, mas com maior diferença para a saúde humana. As categorias Mudança Climática de Longo e de Curto Termo seriam as grandes contribuintes para ambas as ETEs e áreas de proteção. O que pode ser consequência desse trabalho não ter identificado contribuições significativas dos metais para a Ecotoxicidade de Água Doce e Toxicidade Não Cancerígena, tornando a fase de operação, consumidora de eletricidade no caso da ETE LA e produtora de metano, no caso da ETE LE, mais relevante para ciclo de vida das ETEs Lodos Ativados e Lagoas de Estabilização. Neste trabalho também é possível verificar que no caso de ambas as ETEs quando operando na Jamaica, país em que as fontes não renováveis são responsáveis por mais de 92% da eletricidade produzida, os impactos ambientais do sistema de Lodos Ativados são próximos ao dobro do sistema Lagoas de Estabilização. Diferente do que ocorre no cenário do Paraguai, país que obtém 100% da eletricidade de hidroelétricas, onde a Lagoas de Estabilização causaria mais danos do que a ETE Lodos Ativados.

A matriz energética da produção de eletricidade interfere nos danos ambientais nas 2 áreas de proteção, saúde humana e qualidade dos ecossistemas, para os 2 sistemas no qual o consumo de eletricidade é característico do tipo de tratamento, Lodos Ativados e Reator UASB + Lodos Ativados. Ainda que na ETE Reator UASB + Lodos Ativados, o Lodos Ativados, dependente de eletricidade, execute uma função de redução de matéria orgânica complementar ao Reator UASB, o que reduz o consumo de eletricidade para a aeração por vazão de esgoto. No sistema Lagoas de Estabilização, o consumo de eletricidade acontece apenas em atividades auxiliares (iluminação, por exemplo) e com isso, uma variação mínima entre os dois cenários (matriz elétrica Brasileira versus global) foi quantificada. Apesar das diferenças encontrados, o sistema Reator UASB + Lodos Ativados permanece como a ETE de menor danos para as 2 áreas de proteção, e com a ETE Lodos Ativados apresentando mais danos.

c- Análise de sensibilidade da quantidade de energia elétrica consumida:

O consumo de energia elétrica é o maior contribuinte para os danos ambientais dos ETEs que não é associado diretamente as características do esgoto sanitário recebido ou do lodo gerado. E, principalmente, é uma das entradas do inventário provenientes dos questionários das ETEs em operação, tendo diferentes valores para cada tipo de ETE (Tabela 22). Assim, foi feita uma análise de sensibilidade para verificar as variações em consequência da utilização dos valores extremos do questionário dos 3 sistemas.

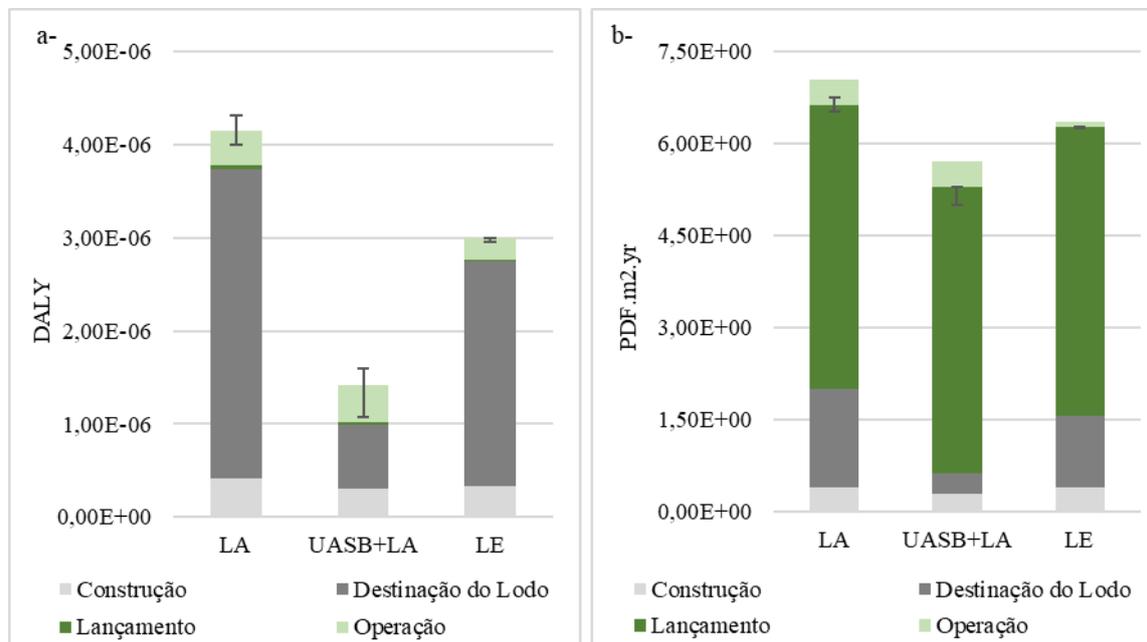
**Tabela 22** – Consumos mínimos, médios (base) e máximos de energia elétrica na fase de Operação dos 3 ETEs em kWh por metro cúbico de esgoto tratado.

Sistema de Tratamento	Média	Mínimo	Máximo
LA	4.01E-01	2.55E-01	5.77E-01
UASB+LA	3.67E-01	2.31E-03	5.42E-01
LE	2.51E-02	1.65E-03	4.85E-02

Fonte: Própria autora.

Apesar dos valores de consumo de energia elétrica variarem entre – 99% e + 96% do consumo médio (Tabela 22), a variação dos danos estimados para ambas as áreas de proteção são bem pequenos como pode ser visto nas barras de erros da Figura 31. Essa análise de sensibilidade reforça o quanto os impactos da fase de Operação, visto que essa etapa é a consumidora de eletricidade, são irrisórios perto da fase de destinação de lodo para a área de proteção saúde humana e dos poluentes remanescentes no lançamento do esgoto tratado para a área de proteção qualidade dos ecossistemas.

**Figura 31** - Variações nos impactos do ciclo de vida (barras de erro) em consequência das variações nos consumos de energia elétrica nos 3 sistemas na fase operação. As contribuições são apresentadas para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita).



Fonte: Própria Autora

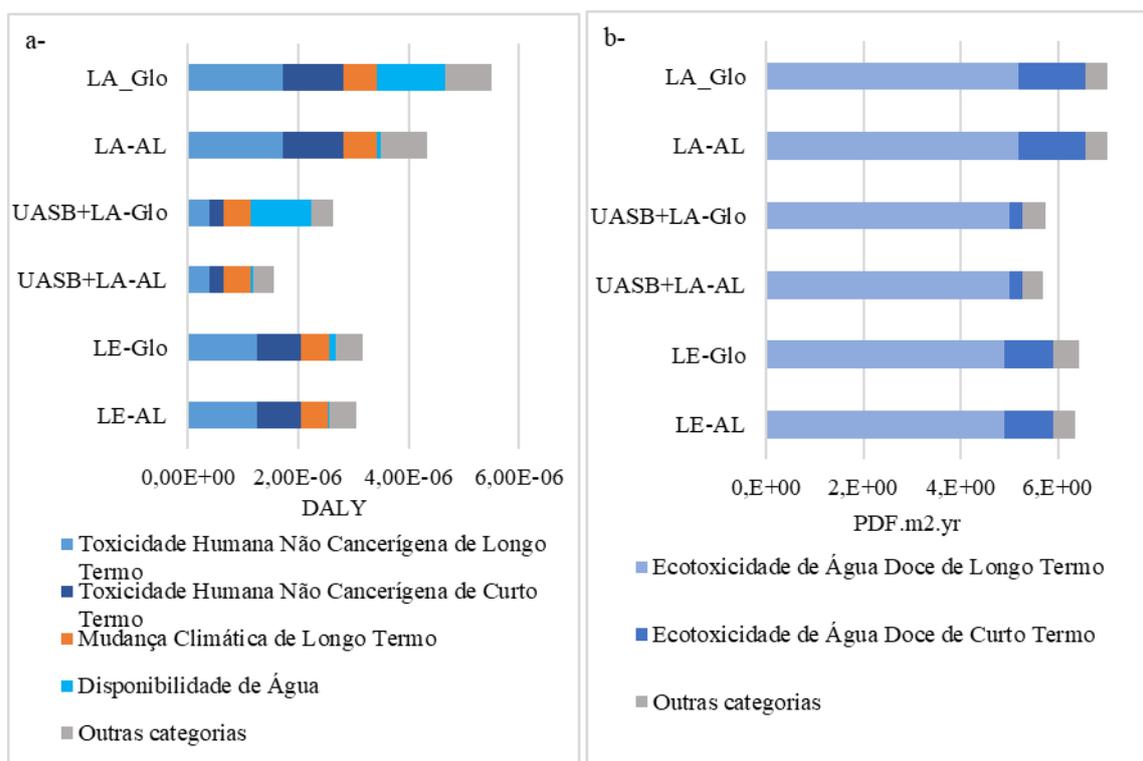
Ainda que o sistema Reator UASB + Lodos Ativados seja o sistema mais sensível as variações na quantidade de eletricidade consumida na fase de operação, essas possíveis

variações encontradas não são suficientes para alterar a ordem de danos ambientais das 3 tipologias: Reator UASB + Lodos Ativados < Lagoas de Estabilização < Lodos Ativados.

d- Regionalização do método de caracterização: Uso da versão *Default* do método IW+

A versão *default* do método *Impact World+* foi utilizada em comparação a versão para a América Latina a fim de se verificar o impacto da Regionalização do método de AICV. Na versão *default* são usados fatores de caracterização (FC) globais, enquanto na versão regional são usados FC obtidos a partir da área de estudo, neste caso a América Latina. Ao se comparar estas duas versões, obteve-se valores maiores dos danos ambientais para ambas as APs com a versão que utiliza FC globais, como pode ser visto na Figura 32.

**Figura 32** – Comparação entre os impactos ambientais calculados com o mesmo método, IW+, um com FC Globais (Glo) e outro com FC para a América Latina (AL) para as 3 ETEs em estudo. As contribuições são apresentadas para as 2 áreas de proteção: a- Saúde humana em DALY (esquerda), e b- Qualidade dos ecossistemas em PDF.m2.year (direita).



Fonte: Própria autora.

Para a AP Qualidade dos ecossistemas, a diferença é muito pequena (menor que 1%). Entretanto, para a AP Saúde humana, este aumento varia de 4% (LE) a 68% (Reator UASB + LA). Grande parte deste aumento é devido a categoria Disponibilidade de Água.

Esta categoria é baseada no índice de escassez de água estimado pelo método AWARE para bacias hidrográficas, estados, regiões infra países, países, regiões do mundo e mundial. Este índice varia de 1 a 100, e é obtido a partir do inverso da diferença entre disponibilidade e demanda. No caso deste trabalho, a utilização da versão para a América Latina apresenta dados mais precisos do que a versão global, porém, se fosse possível utilizar o valor específico para o Brasil, a diferença ainda seria maior, visto que o Brasil tem menor índice de escassez de água do que a América Latina como um todo. Os valores dos índices de escassez, agregados de acordo com o uso da água, são apresentados na Tabela 23 (Boulay et al. 2018).

**Tabela 23** – Valores dos Fatores de caracterização estimados pelo método AWARE para diferentes regiões e para diferentes usos da água.

	Tipos de agregação dos FC		
	Uso em Irrigação	Usos múltiplos - exceto em Irrigação	Uso não especificado
Mundo (GLO)	45,74	20,30	42,95
América Latina	37,846	6,348	31,090
Brasil	2,653	1,899	2,275

Fonte: Adaptado de Boulay et al. 2018 pela autora.

Mesmo com esta grande variação para a AP Saúde humana, a ordem de danos ambientais continua a mesma para ambas as áreas de proteção: Reator UASB + Lodos Ativados < Lagoas de Estabilização < Lodos Ativados.

#### e- Método de caracterização

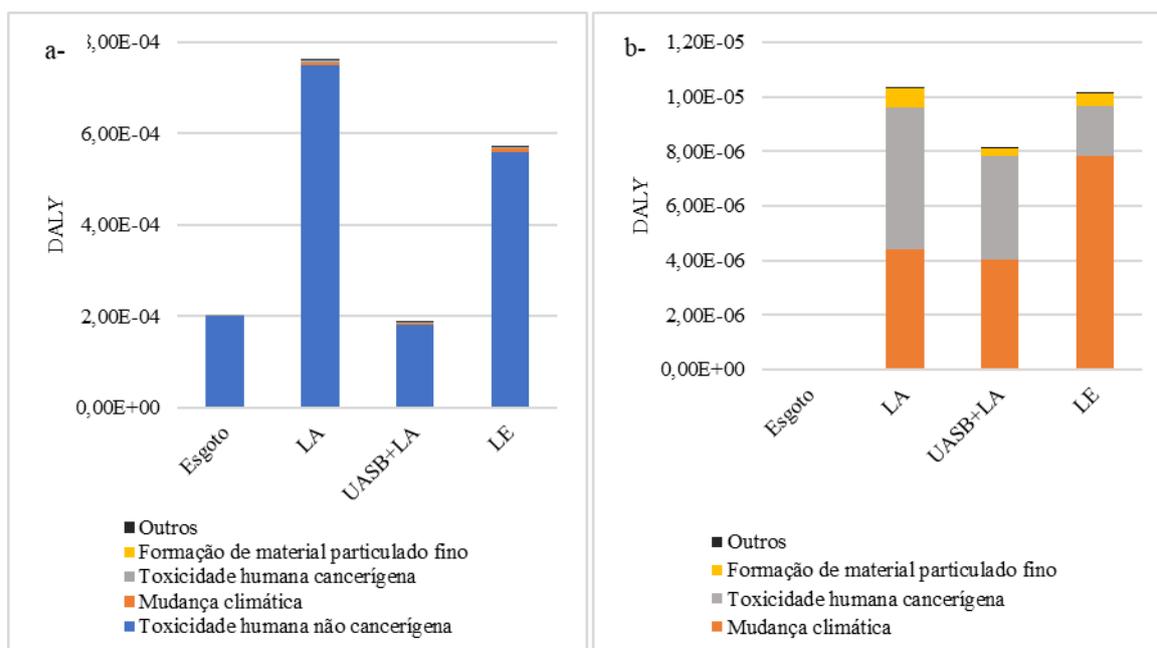
Com o uso do método de caracterização *Impact Word+*, a ETE Lodos Ativados apresentou os maiores impactos ambientais para ambas as áreas de proteção, Saúde humana e Qualidade dos Ecossistemas, seguida da ETE Lagoas de Estabilização e com a ETE Reator UASB + Lodos Ativados por último. Quando as 3 configurações foram comparadas ao lançamento do esgoto sanitário sem tratamento, as 3 configurações geraram mais danos que o lançamento do esgoto sem tratamento para a área de proteção Saúde humana, mas as 3 tiveram menos impactos para a área de proteção Qualidade dos ecossistemas (Figura 27). Para verificar se estes comportamentos ocorrem em outro método de caracterização, foram quantificados os danos ambientais utilizando o método *ReCiPe 2016*. Os resultados obtidos, apresentados nas Figura 33, 34 e 35 para as 3 áreas de proteção que este método permite quantificar, Saúde humana (em DALY), Qualidade dos ecossistemas (em perda de espécies vezes anos) e Escassez de recursos (em dólares).

Diferente dos resultados obtido pelo uso do método *Impact World+*, os danos a Qualidade dos ecossistemas, assim como para a AP Saúde Humana, são maiores em comparação ao lançamento do esgoto sanitário sem tratamento, exceto para a configuração Reator UASB seguido de Lodos Ativados. Não há exceção no caso da AP Escassez de recursos, visto que todas as 3 configurações demandam recursos naturais, fósseis e minerais, para as suas construções e operações e lançar o esgoto sanitário sem tratamento não demanda nenhum material.

Para a AP Saúde humana, Figura 33, mais de 80% desses danos é devido a quantidade de zinco no lodo destinado em aterro, na categoria Toxicidade Humana Não Cancerígena, inclusive para a ETE Reator UASB seguido de Lodos Ativados, única a gerar menos danos à saúde humana que o esgoto sem tratamento, e para o lançamento de esgoto sem tratamento. No caso do lançamento do esgoto sem tratamento, o zinco presente no esgoto, visto que sem tratamento não há geração de lodo. Ao excluir esse impacto, que é devido ao esgoto recebido na ETE e não devido aos processos de tratamento executados das 3 ETEs avaliadas (Figura 33b), Mudança Climática (Aquecimento Global) é a categoria de maior contribuição. Para a configuração Lodos Ativados, cerca de 50% dos danos nessa categoria são devidos a geração de metano em aterro, maior em valor absoluto do que nas outras configurações por gerar mais lodo. O restante deste impacto é causado pelo consumo de eletricidade na operação (21%) e pelas emissões de CO<sub>2</sub> nos ciclos de vida de produção dos materiais de construção (9%). A geração e emissão de metano durante o tratamento do esgoto, não captado, portanto, não queimado a CO<sub>2</sub>, é a maior contribuição nas configurações Lagoas de Estabilização (90%) e Reator UASB seguido de Lodos Ativados (50%). No caso da configuração Lagoas de Estabilização, o restante deste impacto é causado pela geração de metano em aterro (16%) e pelas emissões de CO<sub>2</sub> nos ciclos de vida de produção dos materiais de construção (11%). Para a configuração UASB seguido de Lodos Ativados, o dano remanescente para a categoria Mudança Climática é causado pelas emissões de CO<sub>2</sub> nos ciclos de vida de produção dos materiais de construção (16%) e pela geração de metano em aterro (10%), visto que esta configuração gera menos lodo por volume de esgoto tratado. A categoria Toxicidade Humana Cancerígena é a terceira maior contribuinte para os danos para a AP Saúde humana devido

aos impactos dos ciclos de vida de produção dos materiais de construção para as 3 configurações.

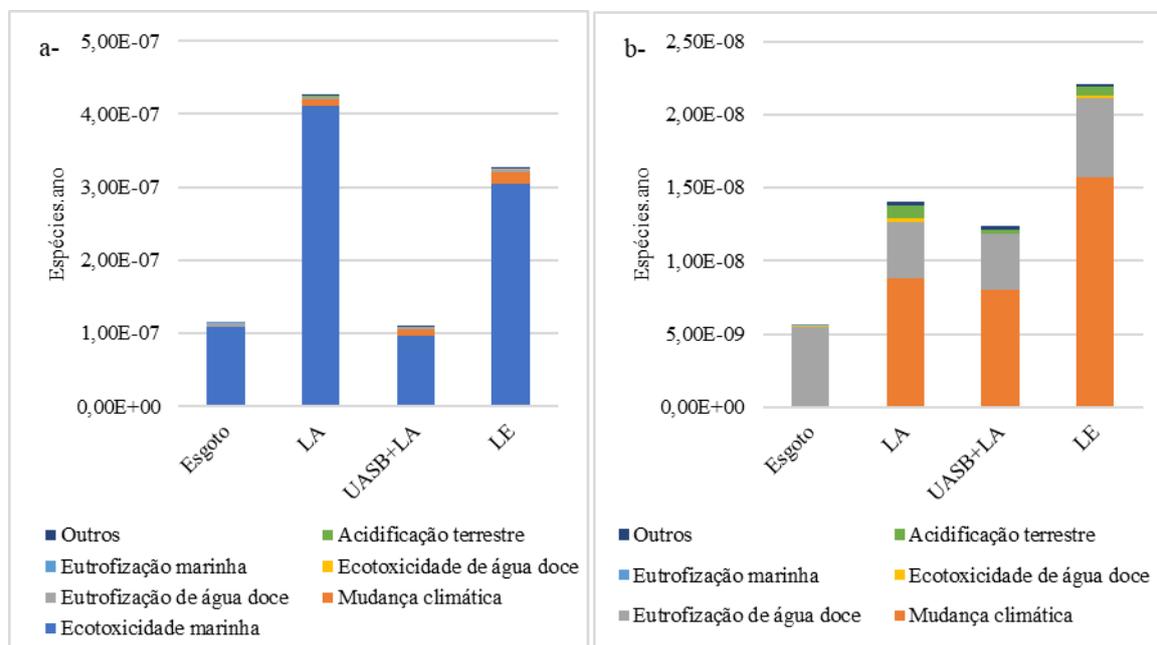
**Figura 33** - Danos à saúde humana das 3 ETEs em comparação ao lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Valores, em DALY, obtidos com o uso do ReCiPe 2016 como método de caracterização. a- Categorias de maior contribuição, e b- Categorias de maior contribuição sem a categoria dominante para melhor visualização.



Fonte: Própria autora

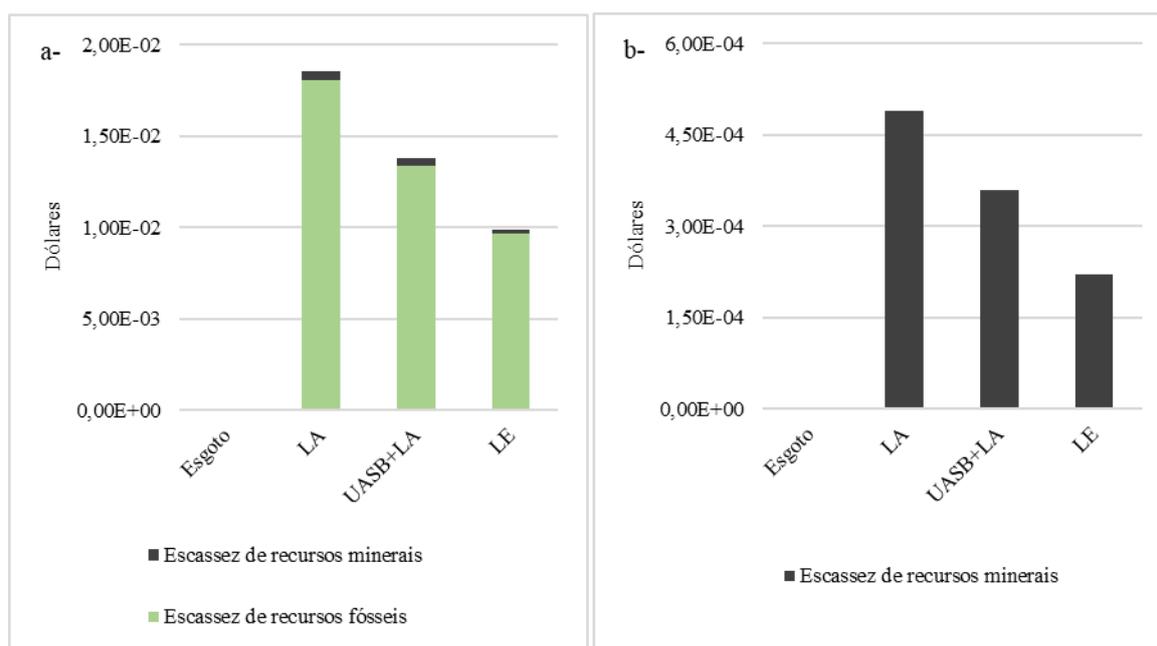
De maneira semelhante a AP Saúde humana, a quantidade de zinco no lodo destinado em aterro, na categoria Ecotoxicidade Marinha, responde por mais de 74% dos danos das 3 ETEs e por 94% dos danos para o lançamento de esgoto sanitário sem tratamento para a AP Ecossistemas (Figura 33). Esta categoria não é quantificada pelo método *Impact World+*. Diferente dos resultados obtidos com o uso do *Impact World+*, a categoria Ecotoxicidade de água doce não é relevante para os danos causados pelos tratamentos. A Eutrofização de água doce é a segunda maior contribuição por categorias relacionadas aos poluentes presentes no esgoto sanitário para os 4 cenários avaliados, mas praticamente insignificante para o resultado total (menor que 5%), devido a concentração de fósforo total no esgoto sanitário sem tratamento e a remoção parcial deste nas 3 configurações avaliadas. Ao se excluir os danos devido a componentes do esgoto sanitário para avaliar os danos gerados exclusivamente pelos tratamentos, a categoria Mudança Climática (Aquecimento Global) é a maior responsável pelos danos para esta AP, com abertura de contribuição de entradas semelhantes à AP Saúde Humana.

**Figura 35** - Danos aos ecossistemas das 3 ETEs em comparação ao lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Valores, em espécies.ano, obtidos com o uso do ReCiPe 2016 como método de caracterização. a- Categorias de maior contribuição, e b- Categorias de maior contribuição sem a categoria dominante para melhor visualização.



Fonte: Própria autora

**Figura 34** – Impacto sob a escassez de recursos das 3 ETEs em comparação ao lançamento de esgoto sanitário sem tratamento. Valores em dólares, obtidos com o uso do ReCiPe 2016 como método de caracterização. a- Escassez de recursos minerais e Escassez de recursos fósseis e b- Categorias de menor contribuição para melhor visualização.



Fonte: Própria autora

Os impactos para a AP Escassez de recursos, Figura 35, são majoritariamente devido ao consumo de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade, para o transporte e para a produção dos materiais de construção. Nesta ordem, exceto para a configuração Lagoas de Estabilização, na qual o diesel consumido na construção é o maior contribuinte. Por não consumir eletricidade para a operação, esta última ETE, LE, apresenta os menores impactos sob a Escassez de recursos.

Desta maneira, vimos que a adoção de outro método de caracterização pode alterar os resultados, principalmente quando comparamos com o lançamento de esgoto sem tratamento, visto que pelo *ReCiPe 2016*, os tratamentos causam mais danos inclusive para a AP relacionada aos ecossistemas, diferente do *Impact World+*. A ETE Reator UASB + Lodos Ativados é uma exceção com redução dos danos exceto para AP Escassez de recurso. Algumas categorias de impacto não são caracterizadas e quantificadas pelos dois métodos, o que prejudica a comparação das categorias de maior contribuição. Entretanto, em comum entre as os resultados obtidos pelos 2 métodos, encontra-se o peso dos poluentes, presentes no esgoto sanitário sem tratamento e que não são removidos nas ETEs avaliadas, para as duas áreas de proteção, Saúde humana e Ecossistemas.

Apesar das ETEs não serem as responsáveis pela produção e incorporação de metais nos corpos hídricos, as ETEs devem ter seus tratamentos aprimorados para a remoção maior destes poluentes, mas com atenção a destinação do resíduo sólido gerado. O ideal seria que apenas os metais de origem natural atingissem os esgotos domésticos, o que pode ser almejado pela remoção dos metais antrópicos nos locais de geração.

A comparação dos resultados destas ACVs com outros trabalhos e a análise de sensibilidade de matriz elétrica comprovaram que os resultados variam pela utilização de dados locais na etapa de inventário, justificando a utilização da Regionalização. Além da matriz elétrica, foi encontrado uma grande variação devido aos metais presentes no esgoto sanitário (quais metais e em que concentrações), que por fim se mostrou a maior fonte de danos ambientais associados as ETEs, seja pela incorporação ao lodo gerado ou pela não remoção da fração líquida.

A utilização dos métodos *ReCiPe 2016* e *Impact World +* na versão default, ambos de abrangência global, não levou a resultados muito diferentes em ordem de ETEs mais nocivas para o meio ambiente, em comparação ao uso do *Impact World +* na versão Regionalizada para a América Latina. Entretanto, o uso do método *ReCiPe 2016* permite identificar a ETE Reator UASB + Lodos Ativados como menos nociva para o meio

ambiente do que lançar esgoto sanitário sem tratamento, exceto para a AP Escassez de recursos. A utilização da versão *default* do IW+ mostrou que os danos podem aumentar em decorrência da menor precisão dos fatores de caracterização adotados, principalmente para a Disponibilidade de água, que possui FC até para bacias hidrográficas.

Importante lembrar que a Regionalização, neste trabalho, foi iniciada com a definição das ETEs a serem avaliadas: Lagoas de Estabilização, Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados. Apesar do aumento da adoção das ETEs por Lodos Ativados no Brasil, principalmente para as grandes cidades, as ETEs Lagoas de Estabilização e Reator UASB ainda são as ETEs predominantes em números no Brasil. Este trabalho permitiu apontar que a ETE Reator UASB complementada pelo Lodos Ativados apresenta menores impactos ambientais para as duas áreas de proteção avaliadas num cenário de Regionalização de dados e de método de impacto. E que a ETE mais adotada no mundo, Lodos Ativados, seria a mais danosa para o meio ambiente no Brasil, devendo ser preterida quando da escolha de uma configuração para o tratamento de esgoto sanitário de uma cidade de população próxima a 10 mil habitantes.

## 7. CONCLUSÕES

Dentre as três tipologias de ETEs avaliadas, Lagoas de Estabilização, Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados, a tipologia Reator UASB + Lodos Ativados apresenta menos danos ao meio ambiente do que as outras duas ETEs para ambas as áreas de proteção, saúde humana e qualidade dos ecossistemas, e o Lodos Ativados é o mais nocivo. Apesar de todos causarem danos na mesma ordem de magnitude. A pouca diferença entre estas tipologias é consequência das grandes contribuições dos poluentes remanescentes no esgoto tratado, principalmente alumínio, para a área de proteção qualidade dos ecossistemas e das características do lodo gerado, principalmente concentração de arsênio, para a área de proteção a saúde humana. As mesmas concentrações de metais foram adotadas para as três tipologias, por serem estas consequências da qualidade do esgoto sanitário recebido. As categorias Ecotoxicidade de Água Doce de Longo e de Curto Termo e Toxicidade Não Cancerígenas de Longo e de Curto Termo são as grandes contribuidoras para os resultados normalizados dessas três tipologias e para as duas áreas de proteção, qualidade dos ecossistemas e saúde humana, respectivamente.

A etapa de construção contribui significativamente para o ciclo de vida das ETEs avaliadas: superior a 10% para a área de proteção saúde humana e superior a 5% para a qualidade dos ecossistemas. Diferente do que geralmente se assume, a construção de ETEs mais tecnológicas ou de maior complexidade, nesse caso a Lodos Ativados, gerou mais danos, em valores absolutos, para ambas as áreas de proteção, entretanto um pouco superior (1,3%) que a tipologia Lagoas de Estabilização para a qualidade dos ecossistemas. A construção das ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lagoas de Estabilização apresentaram os menores impactos para a área de proteção saúde humana, com diferença de 1,2% entre estes. O aço é o material de maior contribuição para a construção das ETEs Lodos Ativados e Reator UASB + Lodos Ativados, e o diesel para a ETE Lagoas de Estabilização. Essa diferença acontece pela utilização de métodos construtivo diferentes na fase de estimativa de materiais de construção e serviços na etapa Inventário do Ciclo de Vida. Em que, a construção das ETEs Reator UASB + Lodos Ativados e Lodos Ativados usariam o sistema concreto armado e a ETE Lagoas de Estabilização seria feita por escavação. Ainda assim, os mesmos materiais são consumidos por estas 2 formas de construção, mas em quantidades e proporções diferentes, o que gerou impactos diferenciados.

O uso do lodo como biofertilizante, com a compensação dos impactos que seriam gerados na produção e transporte do fertilizante, não se mostrou uma alternativa viável do ponto de vista do Ciclo de Vida. Isso porque incorpora diversos metais ao solo agrícola, aumentando o potencial de exposição de humanos a esses metais, o que eleva a Toxicidade Humana Cancerígena de Longo e de Curto Termo. Para a área de proteção Qualidade dos ecossistemas, ocorre uma redução dos impactos ambientais proporcional a geração de lodo pela ETE, isto é, a ETE Lodos Ativados que gera mais lodo, apresentou maior redução dos danos ambientais do tratamento, por evitar a produção de mais fertilizante.

Os impactos quantificados para as 3 ETES se mostraram sensíveis a matriz de produção de eletricidade adotada, com elevação dos danos com o acréscimo da participação de fontes não renováveis nesta e com maior resposta para as ETES mais dependentes de eletricidade, Lodos Ativados e Reator UASB + Lodos Ativados. Da mesma maneira, essas duas ETES teriam uma maior variação de impactos devido a oscilações na quantidade de eletricidade consumida. Entretanto, perto de todos os impactos das ETES, principalmente os causados pelos metais no esgoto tratado e no lodo, esse acréscimo não seria o bastante para alterar a ordem das ETES em danos ao meio ambiente.

O uso do biogás, produzidos no Reator UASB, na Lagoa Anaeróbia e no aterramento dos lodos, para a produção de energia pode ser um ponto de compensação dos impactos ambientais do tratamento de esgoto. Assim como a terra descartada na escavação das Lagoas. Entretanto, mesmo sem considerar estes pontos, as três ETES reduzem em quase 100% os danos, para a área de proteção qualidade dos ecossistemas, do lançamento do esgoto sanitário em corpos hídricos sem tratamento. Mas aumentam os danos para a área de proteção Saúde humana. Utilizando o método *ReCiPe 2016*, apenas a ETE Reator UASB + Lodos Ativados reduz os danos ambientais em comparação ao lançamento de esgoto sem tratamento, aumentando apenas o potencial de escassez de materiais, assim como as outras 2 ETES.

Neste trabalho, a Regionalização feita ao longo de todo o processo: utilização de informações brasileiras nas etapas de definições das ETES de estudo, mais adotadas no Brasil; na realização do inventário com a utilização de dados de ETES em operação no Brasil e da matriz elétrica brasileira; o dimensionamento da ETES com a adoção de parâmetros para regiões de clima quente associado as práticas construtivas locais para

inventariar a construção; e do método *Impact World* + adaptado para a América Latina. Assim, podemos concluir que a ETE Reator UASB + Lodos Ativados apresenta menos impactos ambientais para um cenário Brasileiro de municípios com cerca de 10 mil habitantes e, possivelmente, para outras regiões do mundo com clima quente. Além da vantagem ambiental, esta ETE apresenta baixos custos e simplicidade operacional, em comparação a ETE Lodos Ativados, o que a torna alternativa viável para o aumento do índice de tratamento de esgoto sem maiores encargos a população a ser atendida. Esta vantagem ambiental da ETE Reator UASB foi confirmada com a utilização dos métodos de Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida não regionalizados, *Impact World +Default* e *ReCiPe 2016*.

No campo científico, as duas tipologias de baixa complexidade, Reator UASB e Lagoas de Estabilização, ainda não tinham passado por estimativa de impactos ambientais de forma sistematizada e comparativa, tanto entre si, quanto com a ETE Lodos Ativados. O que se mostrou válido, visto que esta última é a tipologia mais adotada no mundo para o tratamento de esgoto sanitário, mas demanda energia elétrica para o tratamento e gera maior quantidade de lodo a ser destinado, ambos atribuindo custos a esta forma de tratamento e, conforme podemos ver neste trabalho, também aumenta os danos ambientais do tratamento de esgoto sanitário.

O porte das ETEs; a adoção de caracterização de metais iguais para o esgoto tratado das três ETEs e para os lodos gerados; a exclusão das etapas de manutenção e a desativação das ETEs; a não consideração dos micro poluentes orgânicos e da redução dos micro organismos patogênicos; a não reutilização do biogás para geração de energia e da terra retirada na escavação das lagoas; a utilização de processos globais para a produção de materiais de construção, combustíveis e químicos (cal, hipoclorito de sódio e fertilizante) representam as principais limitações desta pesquisa.

Outros tipos de tratamento complementares, como por exemplo os filtros aeróbios e os alagados construídos podem ser avaliados para a redução dos danos ambientais do Reator UASB e da Lagoa Anaeróbia, em substituição ao Lodos Ativados e as Lagoas Facultativas e de Maturação. Além disso, trabalhos futuros podem ser feitos para que o biogás produzidos no Reator Anaeróbio, na Lagoa Anaeróbia e no aterro de resíduos sólidos seja captado e reutilizado para a geração de energia. O que, além de aliviar a carga ambiental destes tratamentos, também geraria renda para a melhoria destes serviços.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044:2009**. [s.l: s.n.].

ABNT. ISO 14040 - Avaliação do CV - Princípios e estrutura. [S. l.], p. 21, 2009. b.

AMORES, Maria José; MENESES, Montse; PASQUALINO, Jorgelina; ANTÓN, Assumpció; CASTELLS, Francesc. Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 43, p. 84–92, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.033.

ANDREOLI, Cleverson Vitorio; VON SPERLING, Marcos; FERNANDES, Fernando. **Assessment of sludge treatment and disposal alternatives**. London: IWA Publishing, 2007.

ARASHIRO, Larissa Terumi; MONTERO, Neus; FERRER, Iveta; ACIÉN, Francisco Gabriel; GÓMEZ, Cintia; GARFÍ, Marianna. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 622–623, p. 1118–1130, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.051.

BERALDI, Gaby Quintal F.; DE REZENDE, Carlos Eduardo; DE ALMEIDA, Marcelo Gomes; CARVALHO, Carla; DE LACERDA, Luiz Drude; DE FARIAS, Roberto Nascimento; VIDAL, Marcella; SOUZA, Michael Douglas P.; MOLISANI, Mauricio Mussi. Assessment of a coastal lagoon metal distribution through natural and anthropogenic processes (SE, Brazil). **Marine Pollution Bulletin**, [S. l.], v. 146, n. November 2018, p. 552–561, 2019. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.007.

BOLDRIN, A.; NEIDEL, T. L.; DAMGAARD, A.; BHANDER, G. S.; MØLLER, J.; CHRISTENSEN, T. H. Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. **Waste Management**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 619–630, 2011. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.025.

BRAGA, A. F. M.; ZAIAT, M.; SILVA, G. H. R.; FERMOSE, F. G. Metal fractionation in sludge from sewage UASB treatment. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 193, p. 98–107, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.01.070.

BRASIL. **Atlas Esgotos**: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil. Brasília. 2020. Disponível em: [https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo\\_livro.pdf](https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf).

BRASIL, CONAMA. **Resolução N° 375**, Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. 2006. p. 1–23.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano base 2019. Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020\\_sp.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf).

BOULAY, Anne-Marie; BARE, Jane; BENINI, Lorenzo; BERGER, Markus; LATHUILLIÈRE, Michael J., MANZARDO, Alessandro; MARGNI, Manuele et al. “The WULCA Consensus Characterization Model for Water Scarcity Footprints: Assessing Impacts of Water Consumption Based on Available Water Remaining (AWARE).” **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.23, n. 2, p. 368–78. DOI: 10.1007/s11367-017-1333-8.

BULLE, Cécile et al. IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], 2019. DOI: 10.1007/s11367-019-01583-0.

CERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 649–679, 2015. DOI: 10.1007/s11157-015-9377-3.

CERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Anaerobic Reactors**. New York: IWA Publishing, 2007. v. 04

CERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos; RIBEIRO, Thiago Bressani; GARCIA, Guilherme Brugger; LERMONTOV, André; PLATZER, Christoph Julius; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; ROSSETO, Mário Augusto Loureiro Leites Renato. Overview of sewage treatment in the South, Southeast and Midwest regions of Brazil: most employed technologies. **Revista DAE**, [S. l.], v. 66, n. 213, p. 5–19, 2018. DOI: 10.4322/dae.2018.028.

COLTRO, Leda. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. [s.l.: s.n.].

COMMISSION, European; JOINT RESEARCH CENTRE; INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND SUSTAINABILITY. **Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**. ISPRA.

COROMINAS, LI; FOLEY, J.; GUEST, J. S.; HOSPIDO, A.; LARSEN, H. F.; MORERA, S.; SHAW, A. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. **Water Research**, [S. l.], v. 47, n. 15, p. 5480–5492, 2013. DOI: 10.1016/j.watres.2013.06.049.

DE SOUSA, M. R. C.; MONTALTO, F. A.; SPATARI, S. Using Life Cycle Assessment to Evaluate Green and Grey Combined Sewer Overflow Control Strategies. **Journal of Industrial Ecology**, [S. l.], v. 16, n. 6, p. 901–913, 2012. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00534.x.

DESLOOVER, Joachim; VLAEMINCK, Siegfried E.; CLAUWAERT, Peter; VERSTRAETE, Willy; BOON, Nico. **Strategies to mitigate N2O emissions from biological nitrogen removal systems**. **Current Opinion in Biotechnology**, 2012. DOI: 10.1016/j.copbio.2011.12.030.

DO AMARAL, Karina Cubas; AISSE, Miguel Mansur; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; PRADO, Marcelo Real. Use of life cycle assessment to evaluate environmental impacts associated with the management of sludge and biogas. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 77, n. 9, p. 2292–2300, 2018. DOI: 10.2166/wst.2018.146.

- EGGEN, Rik I. L.; HOLLENDER, Juliane; JOSS, Adriano; SCHÄRER, Michael; STAMM, Christian. Reducing the discharge of micropollutants in the aquatic environment: The benefits of upgrading wastewater treatment plants. **Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 48, n. 14, p. 7683–7689, 2014. DOI: 10.1021/es500907n.
- EKAMA, G. a. The role and control of sludge age in biological nutrient removal activated sludge systems. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 61, n. 7, p. 1645–1652, 2010. DOI: 10.2166/wst.2010.972.
- EMMERSON, R. H. C.; MORSE, G. K.; LESTER, J. N.; EDGE, D. R. The Life-Cycle analysis of small-scale sewage-treatment processes. **Journal of CIWEM**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 317–325, 1995. DOI: 10.1111/j.1747-6593.1995.tb00945.x.
- FERRAZ, Alexandre de Vicente; POGGIANI, Fábio. Biomass, nutrient and heavy metal in eucalyptus roots fertilized with different sewage sludge. **Cerne**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 311–320, 2014. DOI: 10.1590/01047760.201420021491.
- FILSER, Lukas D.; DA SILVA, Fábio Francisco; DE OLIVEIRA, Otávio José. State of research and future research tendencies in lean healthcare: a bibliometric analysis. **Scientometrics**, [S. l.], p. 1–18, 2017. DOI: 10.1007/s11192-017-2409-8.
- FOLEY, Jeffrey; DE HAAS, David; HARTLEY, Ken; LANT, Paul. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. **Water Research**, [S. l.], v. 44, n. 5, p. 1654–1666, 2010. DOI: 10.1016/j.watres.2009.11.031.
- FORTIER, M. O. P.; ROBERTS, G. W.; STAGG-WILLIAMS, S. M.; STURM, B. S. M. Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae. **Applied Energy**, [S. l.], v. 122, p. 73–82, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.077.
- GALLEGO, Alejandro; HOSPIDO, Almudena; MOREIRA, Maria Teresa; FEIJOO, Gumersindo. Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 52, n. 6, p. 931–940, 2008. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.02.001.
- GARFÍ, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 161, p. 211–219, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.116.
- GODIN, D.; BOUCHARD, C.; VANROLLEGHEM, P. A. Net environmental benefit: Introducing a new LCA approach on wastewater treatment systems. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 65, n. 9, p. 1624–1631, 2012. DOI: 10.2166/wst.2012.056.
- GÜERECÁ, L. P.; MUSHARRAFIE, A.; MARTÍNEZ, E.; HERNÁNDEZ, F.; PADILLA, A.; ROMERO-CASALLAS, L. CISNEROS-ORTIZ, M.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; NOYOLA, A. Life Cycle Inventory of the most representative municipal wastewater treatment technologies of Latin-America and the Caribbean. In: XIVTH IWRA WORLD WATER CONGRESS 2011, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.]

GUINÉE, J. B. et al. **Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards**The Netherlands: Ministry of .... Leiden. DOI: 10.1007/BF02978784.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R.; HUPPES, G.; KLEIJN, R.; DE KONING, A.; VAN OERS, L. **Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. Iia: Guide** (Jeroen B. Guinée, Org.). Leiden.

GUTIERREZ, Katia Gonçalves. **Analysis and management of environmental impact of domestic sewage treatment systems through Life Cycle Assessment**. 2014. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

HAANDEL, Adrianus Van; LUBBE, Jeroen Van der. **Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and Optimization of Activated Sludge Systems**. [s.l.] : IWA Publishing, 2012.

HANDLER, R. M.; SHONNARD, D. R.; KALNES, T. N.; LUPTON, F. S. Life cycle assessment of algal biofuels: Influence of feedstock cultivation systems and conversion platforms. **Algal Research**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 105–115, 2014. DOI: 10.1016/j.algal.2013.12.001.

HERNÁNDEZ-PADILLA, Flor; MARGNI, Manuele; NOYOLA, Adalberto; GUERECIA-HERNANDEZ, Leonor; BULLE, Cecile. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 142, p. 2140–2153, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.068.

HØIBYE, L.; CLAUSON-KAAS, J.; WENZEL, H.; LARSEN, H. F.; JACOBSEN, B. N.; DALGAARD, O. **Sustainability assessment of advanced wastewater treatment technologies**. [s.l: s.n.]. v. 58 DOI: 10.2166/wst.2008.450.

HØIBYE, L.; CLAUSON-KAAS, J.; WENZEL, H.; LARSEN, H. F.; JACOBSEN, B. N.; DALGAARD, O. **Sustainability assessment of advanced wastewater treatment technologies**. [s.l: s.n.]. v. 58 DOI: 10.2166/wst.2008.450.

HOSPIDO, Almudena; MOREIRA, Ma Teresa; FEIJOO, Gumersindo. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). **International Journal of Life Cycle Assessment**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 57–64, 2008. DOI: 10.1065/lca2007.03.314.

IBGE. **Estimativa de População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referencia em 1 de Julho de 2014**. [s.l: s.n.].

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC. **Chapter 1.1 Introduction Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 1 Introduction to the 2006 Guidelines**. [s.l: s.n.].

JOLLIET, Olivier; SAADÉ-SBEIH, Myriam; SHAKED, Shanna; JOLLIET, Alexandre;; CRETAAZ, Pierre. **Environmental life cycle assessment**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

KÖHLER, C.; VENDITTI, S.; IGOS, E.; KLEPISZEWSKI, K.; BENETTO, E.; CORNELISSEN, A. Elimination of pharmaceutical residues in biologically pre-treated hospital wastewater using advanced UV irradiation technology: A comparative assessment. **Journal of Hazardous Materials**, [S. l.], v. 239–240, p. 70–77, 2012. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.006.

LIU, B.; WEI, Q.; ZHANG, B.; BI, J. Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 447, p. 361–369, 2013. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.019.

LOPES, Thaís A. S.; QUEIROZ, Luciano M.; TORRES, Ednildo A.; KIPERSTOK, Asher. Low complexity wastewater treatment process in developing countries: A LCA approach to evaluate environmental gains. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 720, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137593.

LORENZO-TOJA, Yago; VÁZQUEZ-ROWE, Ian; CHENEL, Sergio; MARÍN-NAVARRO, Desirée; MOREIRA, María Teresa; FEIJOO, Gumersindo. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+DEA method. **Water Research**, [S. l.], v. 68, p. 637–650, 2015. DOI: 10.1016/j.watres.2014.10.040.

MENESES, Montse; PASQUALINO, Jorgelina C.; CASTELLS, Francesc. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. **Chemosphere**, [S. l.], v. 81, n. 2, p. 266–272, 2010. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.05.053.

MO, Weiwei; ZHANG, Qiong. **Energy-nutrients-water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants**. **Journal of Environmental Management**, 2013. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.05.007.

MOREIRA, Rodrigo Santos; LENSE, Guilherme Henrique Expedito; FÁVERO, Leonardo Ferreira; JUNIOR, Benedito Majela De Oliveira; MINCATO, Ronaldo Luiz. Nutritional status and physiological parameters of maize cultivated with sewage sludge. **Ciencia e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 44, 2020. DOI: 10.1590/1413-7054202044029919.

MORERA, Serni; SANTANA, Mark V. E.; COMAS, Joaquim; RIGOLA, Miquel; COROMINAS, Lluís. Evaluation of different practices to estimate construction inventories for life cycle assessment of small to medium wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 245, p. 118768, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118768.

MUÑOZ, Ivan; JOSÉ GÓMEZ, M.; MOLINA-DÍAZ, Antonio; HUIJBREGTS, Mark A. J.; FERNÁNDEZ-ALBA, Amadeo R.; GARCÍA-CALVO, Eloy. Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment. **Chemosphere**, [S. l.], v. 74, n. 1, p. 37–44, 2008. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.09.029.

MUÑOZ, Ivan; RODRÍGUEZ, Antonio; ROSAL, Roberto; FERNÁNDEZ-ALBA, Amadeo R. Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment. A focus on toxicity-related impacts. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 407, n. 4, p. 1245–1256, 2009. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.09.029.

MURRAY, Ashley; HORVATH, Arpad; NELSON, Kara L. Hybrid life-cycle environmental and cost inventory of sewage sludge treatment and end-use scenarios: A case study from China. **Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 42, n. 9, p. 3163–3169, 2008. DOI: 10.1021/es702256w.

NAKAKUBO, T.; TOKAI, A.; OHNO, K. Comparative assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 32, p. 157–172, 2012. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.026.

NASCIMENTO, Altina Lacerda; DE SOUZA, Adijailton José; OLIVEIRA, Fernando Carvalho; COSCIONE, Aline Renée; VIANA, Douglas Gomes; REGITANO, Jussara Borges. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 258, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120746.

NGUYEN, Thi Kieu Loan; NGO, Huu Hao; GUO, Wenshan; CHANG, Soon Woong; NGUYEN, Dinh Duc; NGUYEN, Tien Vinh; NGHIEM, Duc Long. Contribution of the construction phase to environmental impacts of the wastewater treatment plant. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 743, p. 140658, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140658.

NIERO, Monia; PIZZOL, Massimo; BRUUN, Henrik Gundorph; THOMSEN, Marianne. Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 68, p. 25–35, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.051.

NOGUEIRA, Thiago A. R.; SAMPAIO, Regynaldo A.; FONSECA, Ivana M.; FERREIRA, Cleidson S.; SANTOS, Sandra E.; FERREIRA, Luiz C.; GOMES, Eduardo; FERNANDES, Luiz A. Heavy metals and pathogens in maize - cowpea intercropping system fertilized with sewage sludge. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 331–338, 2007. DOI: 10.1590/s1415-43662007000300014.

NOYOLA, Adalberto; PADILLA-RIVERA, Alejandro; MORGAN-SAGASTUME, Juan Manuel; GÜERECA, Leonor Patricia; HERNÁNDEZ-PADILLA, Flor. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. **Clean - Soil, Air, Water**, [S. l.], v. 40, n. 9, p. 926–932, 2012. DOI: 10.1002/clen.201100707.

OECD. **Manual de Frascati 2002: metodologia proposta para definição da pesquisa e desenvolvimento experimental**. [s.l.: s.n.].

OKUBO, Y. Bibliometric Indicators and Analysis of Research Systems: Methods and Examples", **OECD Science, Technology and Industry Working Papers**, No. 1997/01, , 1997. OECD Publishing, Paris, DOI: 10.1787/208277770603.

OLIVEIRA, Aline Da Silva; BODO, Ana; BELTRAMINI TREVILATO, Tânia M.; MAGOSSO TAKAYANAGUI, Angela M.; DOMINGO, José L.; SEGURA-MUÑOZ, Susana I. Heavy metals in untreated/treated urban effluent and sludge from a biological

wastewater treatment plant. **Environmental Science and Pollution Research**, [S. l.], v. 14, n. 7, p. 483–489, 2007. DOI: 10.1065/espr2006.10.355.

OLIVEIRA, Sílvia C.; VON SPERLING, Marcos. Performance evaluation of different wastewater treatment technologies operating in a developing country. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, [S. l.], v. 1, p. 37, 2011. DOI: 10.2166/washdev.2011.022.

PANT, Deepak; SINGH, Anoop; VAN BOGAERT, Gilbert; GALLEGU, Yolanda Alvarez; DIELS, Ludo; VANBROEKHOVEN, Karolien. **An introduction to the life cycle assessment (LCA) of bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy and product generation: Relevance and key aspects**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2010.10.005.

PASQUALINO, J. C.; MENESES, M.; CASTELLS, F. Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. **Journal of Industrial Ecology**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 49–63, 2011. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2010.00293.x.

PASQUALINO, Jorgelina C.; MENESES, Montse; ABELLA, Montserrat; CASTELLS, Francesc. LCA as a Decision Support Tool for the Environmental Improvement of the Operation of a Municipal Wastewater Treatment Plant. **Environmental Science & Technology**, [S. l.], v. 43, n. 9, p. 3300–3307, 2009. DOI: 10.1021/es802056r.

PATOUILLARD, Laure; BULLE, Cécile; MARGNI, Manuele. Continental version of IMPACT World+: A regionalized life cycle impact assessment method for Latin America. *In: CILCA 2019*. Cartago. p. 1–6.

PIPI, Angelo R. F.; MAGDALENA, Aroldo G.; GIAFFERIS, Giselda P.; DA SILVA, Gustavo H. R.; PIACENTI-SILVA, Marina. Evaluation of metal removal efficiency and its influence in the physicochemical parameters at two sewage treatment plants. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S. l.], v. 190, n. 5, 2018. DOI: 10.1007/s10661-018-6633-3.

RESENDE, J. D., RODRIGUES, P.F., M. A. et al. Avaliação do Ciclo de Vida de Sistemas de Tratamento de Esgoto por Lodos Ativado Convencional e Reator UASB seguido de Lodos Ativado. *In: 5TH INTERNATIONAL WORKSHOP, ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION 2015*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–10.

RODRIGUES, Maria Isabel. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 3. ed. Campinas, SP: Cárita Editora, 2014.

RODRIGUEZ-GARCIA, G.; MOLINOS-SENANTE, M.; HOSPIDO, A.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. **Water Research**, [S. l.], v. 45, n. 18, p. 5997–6010, 2011. DOI: 10.1016/j.watres.2011.08.053.

ROSA, A. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; LOBATO, L. C. S.; SILVA, R. V.; PADILHA, R. F.; BORGES, J. M. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 124, p. 21–26, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2017.09.025.

SALIBA, Pollyane Diniz; VON SPERLING, Marcos. Performance evaluation of a large sewage treatment plant in Brazil, consisting of an upflow anaerobic sludge blanket reactor followed by activated sludge. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 76, n. 8, p. 2003–2014, 2017. DOI: 10.2166/wst.2017.284.

SCHAUBROECK, Thomas; DE CLIPPELEIR, Haydée; WEISSENBACHER, Norbert; DEWULF, Jo; BOECKX, Pascal; VLAEMINCK, Siegfried E.; WETT, Bernhard. Environmental sustainability of an energy self-sufficient sewage treatment plant: Improvements through DEMON and co-digestion. **Water Research**, [S. l.], v. 74, n. 19, p. 166–179, 2015. DOI: 10.1016/j.watres.2015.02.013.

SILVA, Gil Anderi Da; KULAY, Luiz Alexandre. Avaliação do ciclo de vida. In: JÚNIOR, Alcir Vilela; DEMAJOROVIC, Jacques (org.). **Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental**. 3. ed. São Paulo: Senac São Paulo, 2013. p. 440.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017** (Carlos Henrique Ribeiro Lima, Org.). Brasília: SNS/MDR, 2019. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto - 2019**. Brasília. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2019>.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto - Visão geral - ano de referência 2020**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>.

SOUZA, L. C. F.; CANTERAS, F. B.; MOREIRA, S. Analyses of heavy metals in sewage and sludge from treatment plants in the cities of Campinas and Jaguariúna, using synchrotron radiation total reflection X-rayfluorescence. **Radiation Physics and Chemistry**, [S. l.], v. 95, p. 342–345, 2014. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2013.01.025.

TJANDRAATMADJA, G.; SHARMA, A. K.; GRANT, T.; PAMMINGER, F. A Decision Support Methodology for Integrated Urban Water Management in Remote Settlements. **Water Resources Management**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 433–449, 2013. DOI: 10.1007/s11269-012-0195-x.

TONANI, K. A. A.; JULIÃO, F. C.; TREVILATO, T. M. B.; TAKAYANAGUI, A. M. M.; BOCIO, Ana; DOMINGO, Jose L.; SEGURA-MUÑOZ, Susana I. Behavior of metals, pathogen parasites, and indicator bacteria in sewage effluents during biological treatment by activated sludge. **Biological Trace Element Research**, [S. l.], v. 143, n. 2, p. 1193–1201, 2011. DOI: 10.1007/s12011-010-8906-8.

UGGETTI, Enrica; FERRER, Ivet; MOLIST, Jordi; GARCÍA, Joan. Technical, economic and environmental assessment of sludge treatment wetlands. **Water Research**, [S. l.], v. 45, n. 2, p. 573–582, 2011. DOI: 10.1016/j.watres.2010.09.019.

VON SPERLING, M. **Waste Stabilisation Ponds**. London: IWA Publishing, 2007. a. v. 03

VON SPERLING, Marcos. **Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors**. [s.l.: s.n.]. v. 05

VON SPERLING, Marcos. **Basic principles of wastewater treatment**. [s.l.] : IWA, 2007. c. v. 2 DOI: 10.5860/CHOICE.45-2632.

VON SPERLING, Marcos. Urban wastewater treatment in Brazil. **IDB - Inter-American Development Bank**, [S. l.], n. August, p. 1–102, 2016.

VON SPERLING, Marcos; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Wastewater characteristics, treatment and disposal**. London: IWA Publishing, 2007. v. 1

WANG, R.; ECKELMAN, M. J.; ZIMMERMAN, J. B. Consequential environmental and economic life cycle assessment of green and gray stormwater infrastructures for combined sewer systems. **Environmental Science and Technology**, [S. l.], v. 47, n. 19, p. 11189–11198, 2013. DOI: 10.1021/es4026547.

XU, C.; CHEN, W.; HONG, J. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 67, p. 79–87, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.12.002.