

Gestão sustentável do saneamento

Nota Técnica 2 – Avaliação de ciclo de vida como ferramenta de auxílio à tomada de decisão para a escolha de estações sustentáveis de tratamento de esgoto

Sustainable management of sanitation

Technical Note 2 – Life cycle assessment as a supporting tool to aid decision making in the choice of sustainable wastewater treatment plants

**Matheus Augusto de Oliveira Fernandes¹, Kátia Gonçalves Gutierrez²,
Lucas de Almeida Chamhum Silva³, Lívia Cristina da Silva Lobato⁴,
Carlos Augusto de Lemos Chernicharo^{5*}**

RESUMO

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia de gestão ambiental utilizada para avaliar os impactos ambientais de um produto ou processo ao longo de todo o seu ciclo de vida. Esta ferramenta pode ser usada para auxiliar na escolha de estações de tratamentos de esgoto (ETEs), ainda que sua utilização para este fim ainda seja incipiente no Brasil. A presente nota técnica apresenta uma revisão de estudos de ACV no setor de tratamento de esgoto no Brasil e busca contribuir para a disseminação da metodologia como ferramenta de auxílio à tomada de decisão. Por meio da revisão da literatura, pôde-se observar o aumento no número destes estudos e a versatilidade da ACV, tendo sido aplicada para ETEs com diferentes tecnologias e portes. Dentre os desafios observados para a sua utilização, destaca-se a ausência de inventários regionalizados, que possibilitariam a realização de estudos mais representativos. Embora existam problemas de acessibilidade a *softwares* e bancos de dados, a ACV ainda se destaca como uma ferramenta de análise integrada com grande potencial de utilização no setor.

Palavras-chave: avaliação de impacto, inventário de ciclo de vida, tratamento de esgoto, gestão de subprodutos.

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is an environmental management tool used to estimate environmental impacts of a product or process through its life cycle. This tool can assist in the choice of sewage treatment plants (STPs), although its use for this purpose is still incipient in Brazil. This technical note presents a review of LCA studies in the wastewater treatment sector in Brazil and seeks to contribute to the dissemination of the methodology as a tool to aid decision making. Through the literature review, it is possible to observe the increase in the number of these studies and the versatility of the LCA becomes evident, as it has been being applied to STPs of different technologies and sizes. Among the challenges observed for its use, the absence of regionalized inventories stands out, which would make it possible to carry out more representative studies. Although there are accessibility problems to softwares and databases, LCA still stands out as an comprehensive analysis tool for several parameters and conditions, with great potential for use in the sector.

Keywords: impact assessment, life cycle inventory, wastewater treatment, by-products management.

¹Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Aluno de mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

²Engenheira Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Agrícola - Recursos Hídricos e Ambientais pela UFV. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professora adjunta na Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

³Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁴Engenheira Civil pela UFMG. Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

⁵Engenheiro Civil pela UFMG. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne - UK. Professor titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. Coordenador do INCT ETEs Sustentáveis.

*Endereço para correspondência: Avenida Antônio Carlos 6627 - Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Bloco 1, Belo Horizonte, MG. CEP: 31270-901. E-mail: calemos@desa.ufmg.br

1. INTRODUÇÃO

Na década de 1960, empresas importantes deram os passos iniciais para a quantificação das consequências do ciclo de vida de seus produtos para as várias esferas do meio ambiente (HUNT e FRANKLIN, 1996), contribuindo para que a ideia da complexidade das questões ambientais fosse notada pela comunidade científica. Neste contexto, dada a necessidade de uma metodologia capaz de avaliar implicações econômicas e ambientais para auxílio à tomada de decisão, começaram a serem desenvolvidos os fundamentos para a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

A ACV se apresenta como uma ferramenta de gestão ambiental que tem como objetivo identificar e quantificar os impactos potenciais associados a produtos ou serviços. As bases da ACV remontam aos estudos do *Midwest Research Institute* (MRI) (CHEHEBE, 1997) e do economista Wassily Leontief, ambos na década de 1960. A metodologia foi normatizada pela Organização Internacional para a Padronização (ISO, do inglês *International Organization for Standardization*) em 1997, com a publicação da ISO 14040 (Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura), que culminou na publicação de várias outras normas, como a ISO 14044 (Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e orientações), em 2006, e em 2014 com a ISO 14072 (Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional), que fornece requisitos e diretrizes adicionais para uma aplicação efetiva das outras duas normas. As versões brasileiras das normas foram publicadas em 2009 (NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044) e 2019 (NBR ISO 14072) (ABNT, 2009a; 2009b; 2019).

Como ferramenta de tomada de decisão, a ACV possui a proposta de auxiliar na escolha de tecnologias, produtos e processos mais sustentáveis e menos nocivos ao meio ambiente. Esta é capaz de identificar pontos de atenção até então desconhecidos, bem como oportunidades de melhoria nos processos (COELHO FILHO *et al.*, 2016). Nas últimas décadas, a ACV se tornou uma importante metodologia para entendimento dos impactos potenciais de todo o ciclo de vida dos produtos, o que permite aos tomadores de decisão a escolha de uma alternativa considerando aspectos técnicos e o seu desempenho ambiental (DAVIS, 2013; GUTIERREZ, 2014).

No setor de saneamento e, principalmente, em relação às estações de tratamento de esgoto (ETEs), os estudos de ACV tiveram início na década de 1990 e desde então têm sido utilizados para avaliar os impactos ambientais e, especialmente, para comparar alternativas de tratamento e tecnologias utilizadas (SABEEN *et al.*, 2018). No entanto, esse tipo de aplicação da ACV no Brasil é ainda limitada pelo próprio contexto nacional, tendo em vista: (i) a falta de dados nacionais regionalizados para ETEs; (ii) o difícil acesso a inventários e *softwares*; e (iii) a necessidade de estudos de ACV focados na realidade de saneamento no país. Nesse contexto, a presente nota técnica (NT) busca contribuir para a disseminação da ACV no setor de tratamento de esgoto como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão. É apresentada uma revisão de literatura de trabalhos no setor e as bases, fundamentos e potencialidades da metodologia como ferramenta para escolha de alternativas no tratamento de esgoto.

2. A ACV APLICADA EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Na comunidade científica internacional, sobretudo na europeia, têm sido frequentes os trabalhos utilizando a ACV em ETEs, principalmente devido a incentivos da *International Water Association* (IWA), a partir do *IWA working group for life cycle assessment of water and wastewater treatment*. A Diretiva Europeia 91/271 da Comunidade Europeia Econômica - CEE (CEE, 1991), a qual determinava que todo efluente gerado por populações entre 10.000 e 15.000 habitantes deveria ser tratado em nível secundário, também serviu para impulsionar os estudos de ACV, pois forçou as autoridades europeias a buscarem soluções para a definição das tecnologias de tratamento de esgoto para pequenas comunidades (GALLEGO *et al.*, 2008). Este é um dos fatores que ajudam a explicar o aumento no número de estudos de ACV no setor a partir do ano de 2006 (prazo final da Diretiva), reforçando a sua importância como uma ferramenta cada vez mais aceita para se analisar o desempenho ambiental das ETEs (LOPES *et al.*, 2017).

No Brasil e na América Latina, a aplicação da metodologia de ACV em ETEs ainda é incipiente. Em 2013, foi

publicado o informe técnico intitulado *Water and sanitation: LAC cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy resources*, no qual são apresentadas as ACV dos nove sistemas de tratamento mais utilizados na região da América Latina e Caribe (NOYOLA *et al.*, 2012). Considerando a realidade nacional, é importante citar a Rede Nacional de Pesquisa sobre Tratamentos de Esgoto Descentralizados (RENTED), iniciada em 2012 e concluída em 2018, que teve por objetivo o estudo de ETes locais e descentralizadas, considerando também aspectos de sustentabilidade e gerenciamento de subprodutos. Ao incluir como um dos seus objetivos a aplicação da ACV nestes sistemas, a RENTED figurou-se como um marco para que a metodologia fosse inserida definitivamente na pauta das pesquisas em saneamento no Brasil (GUTIERREZ *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2017).

Por englobar todo o ciclo de vida do produto, a ACV é capaz de apresentar uma visão mais sistêmica para o usuário, permitindo a identificação dos impactos negativos e positivos de cada etapa de tratamento e quais processos e emissões são responsáveis por estes em cada uma das fases. Por possuir uma perspectiva holística do processo produtivo, auxilia a formular estratégias de melhoria e evitar que, na tentativa de tornar a ETE mais sustentável, um impacto ambiental seja apenas transferido de uma etapa do tratamento para outra, também conhecido como *'burden-shifting'*.

Embora seja utilizada para avaliar alternativas de tratamento e/ou rotas de destinação de subprodutos, a ACV não é capaz de definir qual a melhor alternativa ou a menos impactante, todavia constitui um importante componente do processo de decisão. Quando aliada a aspectos locais, de custo, mão de obra, acesso a tecnologia, entre outros, é capaz de fornecer uma visão global do processo para que o usuário da ferramenta de ACV possa definir qual é aquele que melhor se adequa a sua realidade.

3. EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS COM ACV EM ETES

A escolha entre tecnologias de tratamento de esgoto no Brasil se baseia, sobretudo, no atendimento a padrões de lançamento previstos nas legislações e em aspectos econômicos, como demanda por área, energia e recursos

humanos. Embora o tratamento de esgoto usualmente contemple a produção e destinação final de subprodutos, o gerenciamento e o aproveitamento destes, muitas vezes, não são considerados no processo de tomada de decisão.

A partir de 2012 foram publicados e apresentados diversos trabalhos (artigos, dissertações e teses) focados no tratamento de efluentes domésticos utilizando a ACV no Brasil. Pode-se observar uma diversidade grande nos estudos, englobando ETes localizadas em diferentes regiões do país, com portes, tecnologias e níveis de tratamento variados. Todavia, é possível perceber que a análise de sistemas descentralizados de tratamento recebeu destaque, sendo possível citar os trabalhos de Gutierrez (2014), Alves (2016), Buarque *et al.* (2016a), Buarque *et al.* (2016b), Dell'Osbel *et al.* (2017), Lutterbeck *et al.* (2017), Lopes *et al.* (2018) e Resende (2018). A atenção dada aos sistemas descentralizados reflete a tendência nacional do uso destes para atender populações menores (CHERNICHARO *et al.*, 2018) e também os esforços da própria RENTED para o desenvolvimento dessas alternativas. No entanto, ao observar a **Tabela 1**, que apresenta estudos brasileiros de ACV focados no tratamento de esgoto, pode-se perceber que a metodologia também foi aplicada a ETes que atendiam populações superiores a 200.000 habitantes, como é o caso dos estudos de Gutierrez (2014), Amaral *et al.* (2018) e Fernandes *et al.* (2019). A aplicabilidade da metodologia em sistemas de diferentes escalas explicita a versatilidade da ACV como ferramenta de gestão ambiental.

3.1. Limitações da aplicação de ACV no Brasil

A aplicação da ACV no Brasil é ainda limitada, já que os *softwares* consolidados para a realização da ACV ainda possuem custo elevado e baixa acessibilidade, o que contribui para que a metodologia seja vista como cara e morosa. Ademais, a falta de um banco de dados nacional, contendo inventários de ciclo de vida (ICVs) de produtos brasileiros limita a abrangência dos estudos, sua operacionalidade e seus custos (COELHO FILHO *et al.*, 2016). Embora existam iniciativas como a do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), que desenvolve o Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade Ambiental da Indústria Brasileira (SICV-Brasil), este ainda encontra-se bastante incompleto, não constando dados, por exemplo, de ETes.

Como mencionado, a ausência de inventários nacionais e regionalizados para ETEs constitui uma limitação da aplicação da ACV no país (GUTIERREZ *et al.*, 2016), pois culmina na utilização de informações extraídas de bancos de dados disponíveis em bases estrangeiras, que possuem, muitas vezes, baixa aplicabilidade no cenário nacional. No caso do banco de

dados mais conhecido, o Ecoinvent, por exemplo, a ETE padrão disponibilizada em seu sistema trata de uma realidade europeia, sendo a tecnologia de tratamento e as caracterizações de efluente e lodo relacionadas ao cenário suíço (DOKA, 2009), não sendo representativas para o Brasil por apresentarem importantes diferenças em nível de tratamento e aspectos climáticos.

Tabela 1 – Revisão de estudos brasileiros que aplicaram ACV ao tratamento de esgoto.

Autor(es)	Região estudada	População atendida	Fonte dos dados	Sistema analisado	Software	Método de análise
Costa (2012)	Suzano (SP)	350.000 habitantes	ETE adaptada do modelo do banco de dados	Lodos ativados	GaBi 4	CED CML 2001
Tourinho (2014)	Rio de Janeiro (RJ)	20.000 habitantes ⁽¹⁾	Dados de literatura	Lodos ativados; UASB; UASB+Tanque de aeração	SimaPro	ReCiPe
Gutierrez (2014) Gutierrez <i>et al.</i> (2016)	Belo Horizonte (MG)	Sistema centralizado - 1.000.000 habitantes; Sistemas descentralizados -até 10.000 habitantes	Dados primários e de literatura	UASB+Wetland; UASB+Filtro biológico percolador; Lodos ativados	SimaPro	ReCiPe CED
Alves (2016)	Santa Maria (RS)	10 habitantes	Dados primários e de literatura	Wetland vertical	SimaPro	ReCiPe CML CED
Braun <i>et al.</i> (2016)	Florianópolis (SC)	Sistema experimental	Dados primários	Reator em bateladas sequenciais com grânulos	SimaPro	CML 2000
Kramer (2016)	Paranaguá (PR)	60.000 habitantes	ETE adaptada do modelo do banco de dados; dados primários para microcontaminantes	Lodos Ativados	SimaPro	TRACI USEtox
Buarque <i>et al.</i> (2016a)	Fortaleza (CE)	6.145 habitantes	Dados primários	UASB+desinfecção	SimaPro	CML 2000
Buarque <i>et al.</i> (2016b)	Fortaleza (CE)	6.145 habitantes	Dados primários	UASB convencional; UASB com microaeração	SimaPro	CML 2000
Kramer <i>et al.</i> (2016)	Paraná	17.000 habitantes	ETE adaptada do modelo do banco de dados; dados primários para microcontaminantes	Lodos ativados com aeração	SimaPro	TRACI
Dell'Osbel <i>et al.</i> (2017)	Santa Cruz do Sul (RS)	Escala de bancada e piloto	Dados de literatura	Microalgas+Wetland; UASB+Wetland vertical e horizontal	SimaPro	Impact 2002+
Lutterback <i>et al.</i> (2017)	Vera Cruz (RS)	Pequena propriedade rural	Dados primários	UASB+Filtro anaeróbio+Wetland+UV	SimaPro	ReCiPe
Amaral <i>et al.</i> (2018) Amaral (2018)	Curitiba (PR)	235.000 habitantes	Dados primários e de literatura	Diferentes sistemas de gestão do biogás e do lodo de um UASB+Lagoa facultativa	SimaPro	ReCiPe
Lopes (2014) Lopes <i>et al.</i> (2017) Lopes <i>et al.</i> (2018)	Lauro de Freitas (BA)	1.000 habitantes	Dados primários e de literatura	UASB+Wetland+desinfecção	SimaPro	CML 2000
Resende (2018)	São Paulo (SP)	Escala piloto - 4 habitantes		Wetland vertical; Wetland horizontal	OpenLCA	ReCiPe USETox
Fernandes <i>et al.</i> (2019)	Minas Gerais	330.000 habitantes	Dados primários e de literatura	Tratamentos terciários do efluente de um UASB+Filtro biológico percolador	SimaPro	ReCiPe

Nota: ⁽¹⁾Cálculo com base na vazão de esgoto do estudo (3.000 m³d⁻¹), considerando a *quota per capita* de 150 L.hab⁻¹.d⁻¹.

No entanto, pode-se observar na Tabela 1 que nem todos os estudos de ACV de ETEs no Brasil construíram seus próprios inventários, haja vista os trabalhos de Costa (2012), Kramer (2016) e Kramer *et al.* (2016) que analisaram ETEs adaptadas dos modelos inventariados nos bancos de dados.

Há de se considerar também a dificuldade de se construir um inventário nacional que seja representativo, dadas as dimensões continentais do Brasil e as grandes disparidades regionais existentes. Diferenças nas características do efluente, produtos químicos utilizados e destinação dos subprodutos, entre outros, podem ter importante influência no impacto global do produto analisado, sendo necessária uma análise criteriosa desses e de outros aspectos para se obter um resultado representativo para o local onde se passa o estudo. Por exemplo, a utilização da energia elétrica em regiões com uso majoritário proveniente da queima de combustíveis fósseis (termoeletricas), acarreta impactos completamente diferentes quando comparado com regiões que utilizam majoritariamente energia hidrelétrica. Sendo assim, mesmo que em horizonte breve tenhamos avanços no tocante a inventários nacionais, há de se levar em consideração as importantes especificidades regionais, de forma a avaliar a real significância de dados “nacionais” para o país e a representatividade destes resultados para auxiliar a tomada de decisão.

4. BASES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO DE ACV

Em geral, o estudo de ACV pode ser dividido em quatro fases iterativas e bem definidas, conforme indicado na NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b): (1) definição de objetivo e escopo; (2) inventário de ciclo de vida; (3) avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV); e (4) interpretação. Tais etapas são ilustradas na **Figura 1** e apresentadas nas seções a seguir.

4.1. Objetivo e escopo

Nesta etapa, são fixados os propósitos do estudo, o ponto inicial e final de análise, denominada fronteira ou dimensão do estudo, e a unidade funcional, que é uma medida do desempenho do sistema e será utilizada como a referência na qual todas as entradas e saídas devem ser relacionadas. Esta referência é necessária para assegurar que a comparação dos resultados da ACV seja feita numa base comum.

Diante da complexidade do ciclo de vida de alguns produtos ou serviços, os estudos de ACV tendem a limitar as fronteiras do sistema, analisando somente o que está compreendido dentro destas. A abordagem na determinação dos limites do sistema é flexível e depende do objetivo do estudo, podendo focar apenas na fase industrial/operacional do produto ou considerar o ciclo de vida do sistema analisado em sua totalidade, da extração da matéria-prima à disposição final, entre outros.

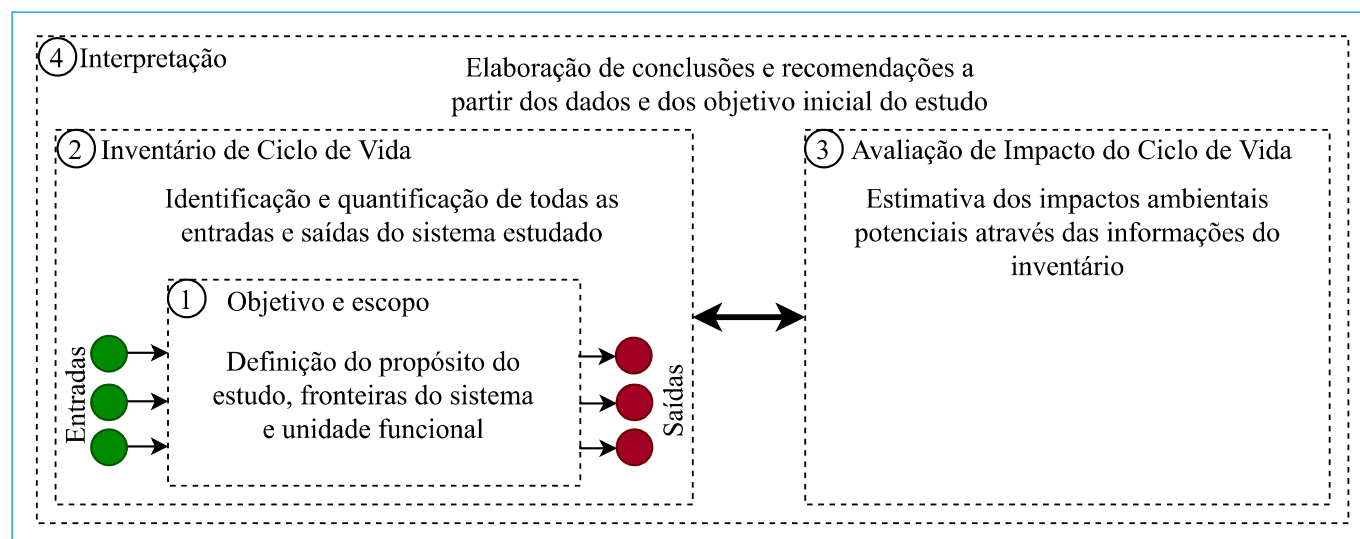


Figura 1 – Etapas da elaboração de um estudo de ACV.

Em se tratando da aplicação em ETEs, considerar apenas a parte operacional tem sido a abordagem mais utilizada, onde se englobam apenas os processos que ocorrem da entrada do esgoto até sua saída da ETE. Assim, comumente, as fases de construção e descomissionamento têm sido desconsideradas (SABEEN *et al.*, 2018), por serem identificadas como pouco expressivas se comparadas à operação (GALLEGO *et al.*, 2008; GÜERECA *et al.*, 2011; ZHANG e WILSON, 2000; EMMERSON *et al.*, 1995). Todavia, os impactos da implantação das ETEs são altamente dependentes da complexidade do sistema e da técnica construtiva (LOPES *et al.*, 2017), portanto a sua consideração deve ser analisada de forma criteriosa pelo usuário de acordo com as particularidades de cada estudo.

Uma vez definido o sistema que será avaliado, é recomendado a elaboração de um fluxograma dos processos que serão considerados. Nessa etapa é importante a delimitação do sistema, evidenciando, por exemplo, os subprodutos produzidos e se estes serão contemplados ou não na ACV. Na **Figura 2** é ilustrado um exemplo de definição das fronteiras, a partir do fluxograma: (1) tratamento da fase líquida; (2) destinação do efluente tratado; (3) tratamento e disposição final do lodo; (4) destinação do biogás.

Outro aspecto a ser definido nessa etapa é a unidade funcional (UF). Nos trabalhos de Mundim *et al.* (2019) e Lopes *et al.* (2017), que analisaram artigos aplicando ACV a ETEs em diversos países, encontrou-se vasta utilização de população equivalente (PE) e do volume de esgoto como unidades funcionais. Esta última é a unidade mais utilizada em estudos brasileiros de ACV em ETEs, sendo o m^3 de esgoto a unidade mais comum entre estes. Por exemplo, se a vazão de esgoto tratado for de $30.000 m^3 \cdot d^{-1}$ e a geração de lodo for de $150.000 kg \cdot d^{-1}$, considerando que o m^3 de esgoto seja a UF, essa saída será reportada como $5 kg \text{ lodo} \cdot m^{-3}$ de esgoto.

4.2. Inventário de Ciclo de Vida

O inventário de ciclo de vida consiste na listagem das operações unitárias que estão compreendidas nas fronteiras do sistema e a quantificação das entradas e saídas de matéria e energia relacionadas a cada uma destas, sendo sempre reportadas segundo a UF. O ICV é fundamental para um bom estudo de ACV, visto que os impactos ambientais potenciais são calculados a partir dos insumos importados para dentro das fronteiras e dos produtos emitidos para fora destas.

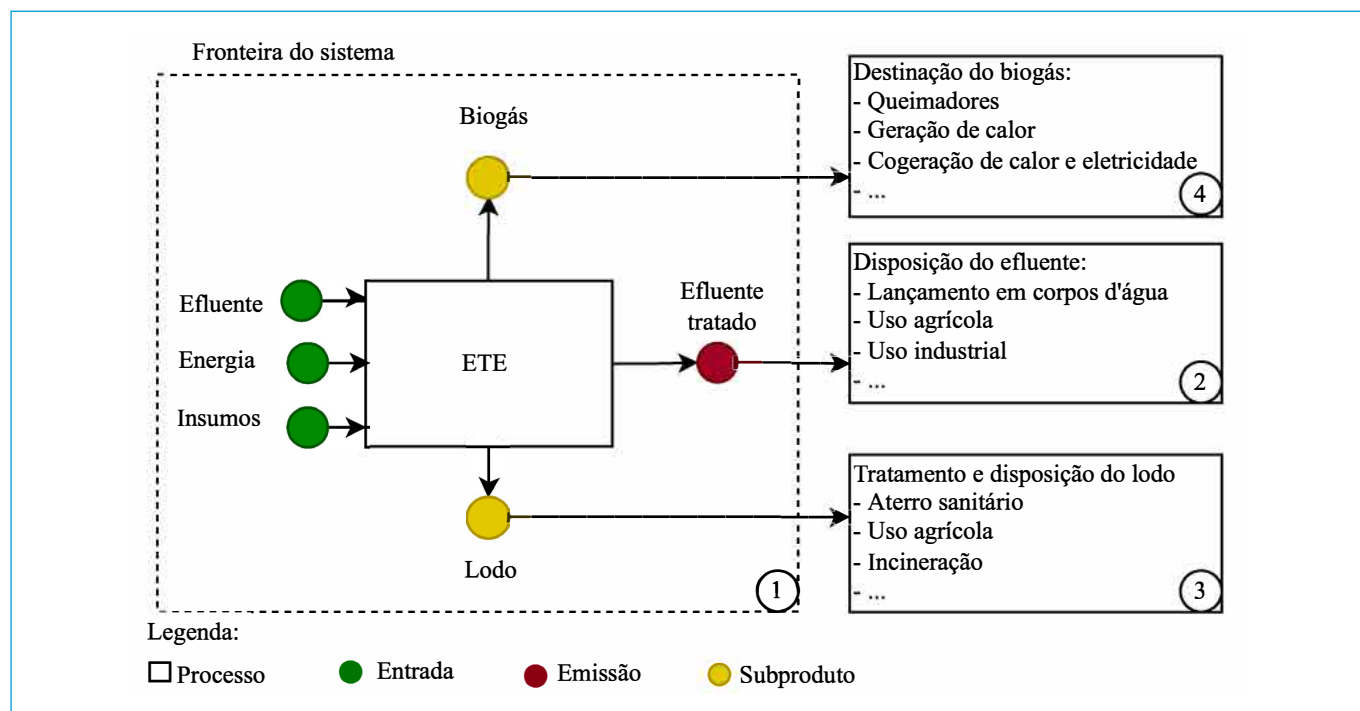


Figura 2 – Exemplo de fluxograma de uma ETE, onde se definem as entradas, saídas e fronteiras do sistema, no qual consta a ETE (1) e possíveis rotas de destinação do efluente tratado (2), tratamento e disposição do lodo (3), e destinação do biogás (4).

Estes são comumente realizados por meio de planilhas, como as reportadas em Gutierrez *et al.* (2016).

Por dificuldades na aquisição de *softwares* necessários para a execução das etapas seguintes, muitos trabalhos se estendem apenas até essa fase. No entanto, em algumas situações, o exercício de construção dos ICV já é por si só capaz de dar direcionamento aos tomadores de decisão. A partir das diferenças nas entradas e saídas, é possível identificar pontos críticos que são relacionados aos impactos ambientais potenciais. Como exemplos, pode-se citar a elevada emissão de metano à atmosfera como diretamente ligada ao impacto de mudanças climáticas, ou o lançamento de efluente de menor qualidade como principal causador do impacto referente à eutrofização de água doce, caso estes não sejam aproveitados em etapas subsequentes ao tratamento.

A partir da análise do ICV e dos impactos potenciais relacionados, também é possível considerar aspectos regionais, tais como acesso a tecnologias específicas ou disponibilidade de área. Nesse sentido, o trabalho de Gutierrez (2014) traz o inventário de seis ETEs, onde o ICV é utilizado para inferir qual sistema seria mais ambientalmente favorável à área estudada. Se o problema em questão é a falta de área disponível para implantação de leitos de secagem de lodo, por exemplo, é possível consultar os ICV e optar por um sistema com uma produção menor de lodo por m³ de esgoto tratado.

O processo de construção do ICV para ETEs não considera apenas fluxos relacionados ao tratamento em si, como é o caso do esgoto tratado comumente lançado no corpo d'água, mas envolve também produtos que possuem um ciclo de vida independente da ETE, como energia elétrica e produtos químicos. Para isso, faz-se uso das bases de dados, onde é possível encontrar ICVs destes produtos para que eles sejam contemplados no ICV da ETE e possam ser utilizados posteriormente no cálculo dos impactos ambientais. As bases de dados normalmente integram os *softwares* utilizados em estudos de ACV e podem ser desenvolvidas pelo governo federal, como é o caso da *Ökobaudat* (Alemanha), por órgãos independentes, como é o caso do *Nationale Milieudatabase* (Holanda), ou do *Ecoinvent*, base que disponibiliza ICVs com dados de vários países. Desta forma, caso a ETE utilize cal, por exemplo, não é

necessário inventariar todo o ciclo de vida deste material, pois é possível buscá-lo na base de dados e incluí-lo no escopo do estudo. Sendo assim, todos os impactos relacionados à produção, ensacamento, transporte, entre outros processos envolvidos na produção da cal, serão contemplados na avaliação final dos impactos da ETE.

No entanto, como já explicitado anteriormente, a construção de uma base de dados com ICVs específicos para o Brasil ainda é uma limitação da aplicação da ACV, dados os poucos processos presentes no Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV). Por conseguinte, muitas vezes é necessário recorrer a bancos de dados internacionais, que podem conter processos produtivos com pouca representatividade no cenário nacional, mas que ainda assim oportunizam a realização dos estudos.

4.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

Na etapa de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV), os dados levantados e padronizados de acordo com a unidade funcional adotada são associados às categorias de impacto selecionadas para o estudo e os impactos ambientais potenciais são calculados.

A quantificação dos impactos ambientais na ACV é feita a partir de *softwares* específicos, onde o ICV é finalmente inserido e os impactos potenciais são calculados. Uma vez inseridos os dados no programa, este é capaz de estimar, por meio de um método de cálculo a ser escolhido pelo usuário, os impactos ambientais potenciais, que serão tipificados em categorias de acordo com o indicador definido pelo método. Através dos dados de emissão de gases causadores de efeito estufa, por exemplo, o *software* é capaz de estimar o potencial de impacto na categoria de mudanças climáticas, que normalmente possui o kg de CO₂ equivalente com o seu indicador.

Tais *softwares* são usualmente desenvolvidos por agências ambientais governamentais e empresas, podendo ser pagos, como é o caso dos mais utilizados, ou disponibilizados de forma livre. A partir da inserção do ICV, o cálculo será realizado de acordo com o *software*, com o método escolhido e com as categorias de impacto que serão selecionadas. Na **Figura 3** é apresentado um esquema de como são realizadas as AICVs, com exemplos de *softwares*, métodos e categorias.

Como apresentado na Figura 3, muitos *softwares* podem ser utilizados, sendo que cada um possui uma abordagem específica. Embora a utilização de *softwares* livres como o OpenLCA, da empresa GreenDelta, tenha se intensificado nos últimos anos (RESENDE, 2018), os programas pagos ainda são maioria. Como demonstrado na Tabela 1, a maioria dos trabalhos brasileiros utilizou o *software* SimaPro, o que reflete a tendência mundial em estudos de ACV (LOPES et al., 2017; JUNQUEIRA, 2016) e em especial para ETEs.

Sequencialmente à escolha do *software*, há de se definir o(s) método(s) de avaliação de impacto, cuja função é estimar os impactos ambientais potenciais por meio dos dados incluídos no *software*. Esses métodos de avaliação carregam consigo categorias de impacto onde se tipificam e quantificam os impactos ambientais e diferentes sistemas de valoração de certos elementos/parâmetros em detrimento de outros, de acordo com sua proposta. Existe uma grande variedade de métodos, que comumente são desenvolvidos de forma independente dos *softwares*, também por agências ambientais ou empresas, visando determinar fórmulas para converter cargas ambientais em impactos potenciais, a partir dos fatores de impacto. O método TRACI, por exemplo, foi desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e o cálculo dos impactos foi desenvolvido mais especificamente para os Estados Unidos e Canadá. Já o ReCiPe, desenvolvido pela Universidade de Leiden (Holanda), possui a proposta de ter fatores de

impacto globais, que seriam valores médios que podem ser utilizados em qualquer ecossistema.

O método e as categorias de impacto devem ser escolhidos de acordo com o objetivo do estudo e para representar da forma mais fidedigna possível como as cargas ambientais, associadas às entradas ou saídas do sistema, causariam potenciais impactos no ambiente estudado. Nos estudos avaliados por Corominas et al. (2013) e Sabeen et al. (2018), bem como nos estudos apresentados na Tabela 1, constata-se que não há um consenso entre os autores em relação ao método a ser utilizado para realização de ACV em ETEs. Não existem métodos desenvolvidos especificamente para o cenário nacional ou mesmo para a América Latina, e, por isso, tende-se a usar métodos que possibilitam estimar impactos em nível global, como o ReCiPe, CML ou IMPACT World+. No entanto, esse tipo de abordagem pode gerar resultados pouco representativos, pois em países como o Brasil, que possui extensão continental e uma grande variedade de ecossistemas, cada um reagiria a cargas ambientais de maneira diferente.

Cientes da demanda por métodos de avaliação capazes de ilustrar a realidade do cenário nacional, o IBICT desenvolveu o “Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro”, relatório técnico em que foram examinados diversos métodos de avaliação com base em seu escopo geográfico, método de cálculo e aprovação pela comunidade científica, visando a regionalização dos modelos de caracterização para aplicação no Brasil (RAICV, 2019). Para cada categoria de impacto, o relatório traz recomendações

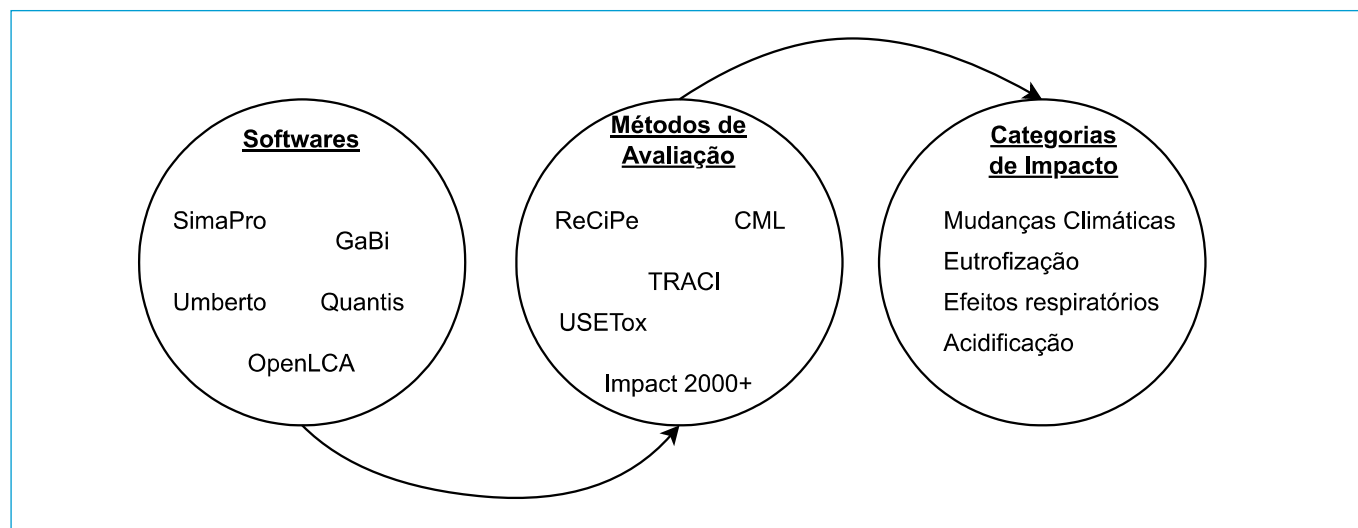


Figura 3 – Desenho esquemático das ferramentas utilizadas na Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).

de métodos que seriam mais representativos para o Brasil, com base em suas características. No entanto, considerando que não há soluções imediatas para a ausência de um método único capaz de ilustrar de maneira mais fidedigna os impactos potenciais em biomas brasileiros, são recomendados métodos que apresentam abrangência classificada como global (MENDES *et al.*, 2016). Dentre estes, o método ReCiPe se destaca por ser um dos mais utilizados nos estudos de ACV em ETEs, como se pode observar na Tabela 1.

Na **Tabela 2** são apresentados os principais métodos de avaliação de impactos e como as saídas mais comuns de uma ETE são consideradas para o cálculo dos potenciais impactos em diferentes categorias. Os parâmetros foram listados na ordem de importância para o cálculo do potencial de impacto final. Para mudanças climáticas, por exemplo, o óxido nitroso (N_2O) possui maior peso que o metano (CH_4), logo, é listado em primeiro lugar. É importante destacar que parâmetros constantemente monitorados em ETEs podem não ser diretamente aplicados nas AICV. Um exemplo clássico é a demanda química de oxigênio (DQO), que pode ser utilizada para o cálculo da produção de gases (e posterior inserção no ICV específico do manejo dos subprodutos, por exemplo), mas que inserido diretamente no *software* não necessariamente resultaria em aumento nos impactos ambientais, já que não é contemplado de forma direta por alguns dos métodos citados.

4.4. Interpretação

Para o cálculo dos impactos ambientais, os programas consideram apenas as entradas que são importadas para dentro das fronteiras do sistema e as saídas que são emitidas do interior das fronteiras para o meio ambiente. Desta forma, a inserção dos dados do ICV nos *softwares* se dá a partir da inclusão de entradas da esfera tecnológica, como energia e cal, por exemplo, e da natureza, que são normalmente matérias-primas utilizadas em processos construtivos. No caso das entradas da esfera tecnológica, normalmente se faz uso das bases de dados para buscar ICVs contendo as entradas e saídas envolvidas nos processos de produção e utilização destes produtos. Para as saídas, é possível incluir emissões para o ar, água e solo, como o efluente lançado no corpo d'água ou as emissões

atmosféricas dos reatores biológicos. Produtos intermediários, isto é, saídas de um processo unitário que serão posteriormente entradas de outro processo (dentro da fronteira ou não) não são contabilizadas na AICV.

Uma vez estimados os impactos ambientais potenciais, cabe ao usuário interpretar e obter as conclusões pertinentes à sua realidade. A ACV é uma ferramenta que auxilia na determinação do melhor cenário de tratamento ou da tecnologia menos impactante. Porém, a importância de cada impacto ambiental deve ser avaliada de acordo com a realidade do local de estudo e quais as prioridades definidas para a investigação. As informações desenvolvidas num estudo ACV são um indicativo dos encargos ambientais do empreendimento e suas potencialidades de aprimoramento e, portanto, devem ser utilizadas como mais um componente no processo de decisão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a aplicação da ACV em ETEs ainda seja incipiente no Brasil, esta se encontra numa crescente. Na revisão realizada, observa-se que grande parte dos dados utilizados nos estudos brasileiros de ACV ainda são baseados em dados coletados em outros países, seja na construção dos inventários das ETEs, no momento de adicionar elementos provenientes das bases de dados, ou no cálculo dos impactos ambientais. A fim de aumentar a representatividade dos estudos, é necessário que um modelo ilustrativo do sistema seja pensado a cada caso, incluindo de forma bastante consciente os limites do estudo.

Em que se pesem os entraves na aquisição de *softwares* e bancos de dados, a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida, onde constam as entradas e saídas do sistema, já pode servir como um forte indicador dos pontos críticos do empreendimento, o que pode auxiliar no direcionamento das tomadas de decisão. No tocante à Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida, mesmo que ainda não existam métodos de avaliação específicos para o Brasil, já são observadas iniciativas visando regionalizar as análises. Na ausência de soluções imediatas, recomenda-se utilização de métodos de avaliação globais, como o ReCiPe, ainda que estes não sejam completamente representativos.

Tabela 2 – Exemplos de métodos de impacto, suas categorias e quais emissões influenciam em cada uma destas.

Método	Categoria	Meio	Emissão
ReCiPe Midpoint H (HUIJBREGTS <i>et al.</i> , 2017)	Mudanças climáticas	Ar	N ₂ O; CH ₄
	Depleção de ozônio estratosférico	Ar	N ₂ O
	Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	Ar	Óxidos de nitrogênio
	Formação de particulado fino	Ar	Particulados < 2,5µm; óxidos de enxofre; amônia; óxidos de nitrogênio
	Acidificação terrestre	Ar	Amônia; óxidos de enxofre; óxidos de nitrogênio
	Eutrofização de água doce	Água	Fósforo total
	Eutrofização marinha	Água	Nitrogênio total; amônia
TRACI (US-Canadian 2008) (BARE, 2012)	Mudanças climáticas	Ar	N ₂ O; CH ₄
	<i>Smog</i>	Ar	Óxidos de nitrogênio; CO; CH ₄
	Acidificação	Ar	Amônia; óxidos de enxofre; óxidos de nitrogênio
	Eutrofização	Ar	Amônia; óxidos de nitrogênio
		Água	Fósforo total; amônia; nitrato; DBO e DQO
Efeitos respiratórios	Ar	Particulados; amônia; SO ₂ ; óxidos de nitrogênio; CO	
CML IA (WORLD 2000) (UNIVERSITEIT LEIDEN, 2016)	Mudanças climáticas	Ar	N ₂ O; CH ₄
	Toxicidade humana	Ar	Óxidos de nitrogênio; amônia; SO ₂
	Oxidação fotoquímica	Ar	SO e SO ₂ ; NO ₂ ; CO; CH ₄ ; NO (impactos positivos)
	Acidificação	Ar	Amônia; óxidos de enxofre; óxidos de nitrogênio
	Eutrofização	Água	Fósforo total; amônia; nitrito e nitrato; nitrogênio total; DQO
Ar		Amônia; N ₂ O; Óxidos de nitrogênio	
Impact 2002+ (HUMBERT <i>et al.</i> , 2014)	Mudanças climáticas	Ar	N ₂ O; CO; CH ₄
	Inorgânicos respiratórios	Ar	Particulados; óxidos de nitrogênio; Amônia; óxidos de enxofre; CO
	Acidificação/nutrição terrestres	Ar	Amônia; óxidos de nitrogênio; óxidos de enxofre
	Acidificação aquática	Ar	Amônia; óxidos de nitrogênio; SO e SO ₂
		Água	Amônia
	Não-carcinogênicos	Água	Amônia
		Ar	Amônia
	Ecotoxicidade aquática	Água	Amônia
	Ecotoxicidade terrestre	Água	Amônia
	Eutrofização aquática	Água	Fósforo total; DQO
Ar		Fósforo total	

Dentre as principais limitações para a aplicação e disseminação da ACV no país, destaca-se a baixa acessibilidade às ferramentas necessárias para sua aplicação e, principalmente, dificuldade de ter acesso a dados regionalizados. Contudo, estudos de ACV no tratamento de esgoto reforçam a importância e versatilidade da metodologia. A elaboração desses estudos é fundamental para aumentar

o alcance da ACV, ampliando a disponibilidade de dados, contribuindo para a elaboração de inventários nacionais e para o conhecimento acerca dos impactos ambientais dos sistemas de tratamento de esgoto. Assim, este trabalho almeja contribuir para a disseminação da ACV como ferramenta de auxílio à tomada de decisão para a escolha de ETes ambientalmente sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa

do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a. 10 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b. 46 p.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 14072: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e diretrizes para a avaliação do ciclo de vida organizacional*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019. 29 p.
- ALVES, D. A. *Avaliação do Ciclo de Vida-ACV de um sistema de wetland construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico*. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Centro de tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- AMARAL, K. C.; AISSE, M. M.; POSSETI, G. R. C.; PRADO, M. R. Use of life cycle assessment to evaluate environmental impacts associated with the management of sludge and biogas. *Water Science and Technology*, v. 77, n. 9, p. 2292-2300, 2018.
- AMARAL, K. G. C. *Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento do lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos, utilizando a técnica de ACV*. 2018. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- BARE, J. C. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI), Version 2.1 - User's Manual; EPA/600/R-12/554 2012.
- BRAUN, P.; ZANGHELINI, G. M.; SOARES, S. R. Avaliação de ciclo de vida de um reator em bateladas sequenciais. *Mix Sustentável*. v. 2, n. 2, 2016. Disponível em: < <http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1628>>. Acesso em: 08 julho 2020.
- BUARQUE, P.; SOUSA, M. R. S.; PESSOA, G. P.; NASCIMENTO, J. G. Análise do ciclo de vida de uma estação de tratamento de esgotos em escala real do tipo UASB seguido de cloração. In: *V Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida*, 2016, Fortaleza, Brasil. *Proceedings*. Fortaleza, Brasil: EMBRAPA, IBICT, UTFPR, 2016a.
- BUARQUE, P.; SOUSA, M. R. S.; PESSOA, G. P.; NASCIMENTO, J. G. Avaliação do ciclo de vida de sistemas de tratamento de esgoto por reator UASB convencional e reator UASB com microaeração. In: *V Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida*, 2016, Fortaleza, Brasil. *Proceedings*. Fortaleza, Brasil: EMBRAPA, IBICT, UTFPR, 2016b.
- CEE. Comunidade Europeia Econômica. Diretiva 91/271/CEE Relativa ao tratamento de águas residuais urbanas. *Jornal Oficial das Comunidades Europeias*. p. 40-52. 1991.
- CHEHEBE, J. R. *Análise do Ciclo de Vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000*. Rio de Janeiro: Qualitymark, CNI, 1997.
- CHERNICHARO, C.A.L.; RIBEIRO, T. B.; PEGORINI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; MIKI, M. K.; SOUZA, S. N. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 1: Tópicos de Interesse. *Revista DAE*, v. 66, n. 214, p. 05-16. 2018.
- COELHO FILHO, O.; SACCARO JUNIOR, N. L.; LUEDEMANN, G. A. Avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil. Texto para discussão/ IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=28041. Acesso em: 25 de outubro de 2021.
- COROMINAS, L. I.; 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*, v. 47, n. 15, p. 5480-5492, 2013.

- COSTA, L. B. O. *Avaliação do ciclo de vida da produção de biogás via Estação de tratamento de esgoto e uso em célula a combustível de óxido sólido*. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em ciências na área de tecnologia nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- DAVIS, M. 3 myths about product life cycle assessments. Greenbiz, 17 May, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/4HHuj7>>. Acesso em: 14 fev. 2020.
- DELL'OSBEL, N.; MACHADO, E. L. Análise do Ciclo de Vida de sistemas de tratamento de efluentes urbanos utilizando microalgas e wetlands construídos. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017*, São Paulo, Brasil. *Anais Eletrônicos*. São Paulo, Brasil: ABES FENASAN, 2017.
- DOKA, G. *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services*. Ecoinvent report No. 13. Dübendorf, Zwitterland: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2009. 111 p.
- EMMERSON, R. H. C.; MORSE, G. K.; LESTER, J. N.; BORDA, D. R. The life-cycle analysis of small-scale sewage-treatment processes. *Water and Wastewater Technology*, v. 9, p. 317-325, 1995.
- FERNANDES, M. A. O.; GUTIERREZ, K. G.; AMARAL, K. G. C.; SILVA, L. A. C.; MOTA FILHO, C. R. Comparação de possíveis fluxogramas para o tratamento terciário do esgoto sanitário utilizando a Avaliação de Ciclo de Vida. In: 2º Seminário Nacional sobre Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto, 2019, Fortaleza, Brasil. *Proceedings*. Fortaleza, Brasil: INCT ETEs Sustentáveis, 2019.
- GALLEGO, A.; HOSPIDO, A.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, p. 931-940. 2008.
- GÜERECA, 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: *XIV IWRA World Water Congress, 2011*, Porto de Galinhas, Brasil. *Proceedings*. Porto de Galinhas, Brasil: IWRA, 2011.
- GUTIERREZ, K. G. *Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida*. 2014. 129 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- GUTIERREZ, K. G.; FERNANDES, M. A. O.; CHERNICHARO, C. A. L. Estruturação de inventários de ciclo de vida nacionais de sistemas de tratamento de esgoto doméstico simplificados. In: *V Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, 2016*, Fortaleza, Brasil. *Proceedings*. Fortaleza, Brasil: EMBRAPA, IBICT, UTFPR, 2016.
- HUIJBREGTS, M. A. J.; Steinmann, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 138-147, 2017.
- HUMBERT, S.; SCHRYVER, A. D.; BENGHOA, X.; MARGNI, M.; JOLLIET, O. IMPACT 2002+: User Guide. 2014. Disponível em: <https://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002+_UserGuide_for_vQ2.21_30April2014a.pdf>. Acesso em 14 fev. 2020.
- HUNT, R. G.; FRANKLIN, W. E.; HUNT, R. G. LCA - How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 1, n. 1, p. 4-7, 1996.
- JUNQUEIRA, R. C. *Valoração monetária dos impactos ambientais de usinas fotovoltaicas através de avaliação de ciclo de vida*. 2016. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- KALBAR, P. P.; MUÑOZ, I.; BIRKVED, M. WW LCI v2: A second-generation life cycle inventory model for chemicals discharged to wastewater systems. *Science of the Total Environment*, v. 622, p. 1649-1657, 2018.
- KRAMER, R. D. *Avaliação do desempenho ambiental de uma ETE considerando a presença dos contaminantes emergentes*. 2016. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- KRAMER, R. D.; PRADO, M. C.; AZEVEDO, J. C. R. Análise do desempenho ambiental de uma estação de tratamento de efluentes municipal. In: *V Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, 2016*, Fortaleza, Brasil. *Proceedings*. Fortaleza, Brasil: EMBRAPA, IBICT, UTFPR, 2016.
- LAURENT, A.; CLAVREUL, J.; BERNSTAD, A.; BAKAS, I.; NIERO, M.; GENTIL, E.; CHRISTENSEN, T. H.; HAUSCHILD, M. Z. Review of LCA studies of solid waste management systems-Part II: Methodological guidance for a better practice. *Waste management*, v. 34, n. 3, p. 589-606. 2014.

- LOPES, T. A. S. *Avaliação do ciclo de vida de uma ETE composta por reator UASB seguido de Wetlands construídos*. 2014. 68 f. Dissertação (mestrado em meio ambiente, águas e saneamento). Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.
- LOPES, T. A. S.; KIPERSTOK, A.; ZANTA, V. M.; QUEIROZ, L. M. Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos. *Revista DAE*, v. 65, n. 208, p. 47-55. 2017.
- LOPES, T. A. S.; QUEIROZ, L. M.; KIPERSTOK, A. Desempenho ambiental de uma estação de tratamento de esgoto em escala real aplicando a Avaliação de Ciclo de Vida. *Revista Ambiente & Água*, v. 13, n. 4, 2018.
- LUTTERBECK, C. A.; KIST, L. T.; LOPEZ, D. R.; ZERWES, F. V.; MACHADO, E. L. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment systems with constructed wetlands in rural areas. *Journal of Cleaner Production*, v. 148, p. 527-536, 2017.
- MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production*, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2016.
- MUNDIM, B. C.; JUNIOR VOLSCHAN, I.; HOFFMAN, B. C. Utilização da avaliação do ciclo de vida em sistemas de esgotamento sanitário. In: *30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2019, Natal, Brasil. *Proceedings*. Natal, Brasil: ABES, 2019.
- NOYOLA, A.; PADILLA-RIVERA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M. L.; GUERECA, L. P.; HERNANDEZ-PADILLA, F. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. *Clean - Soil, Air, Water*, v. 40, n. 9, p. 926-932, 2012.
- RAICV. Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida. Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro. Organização: Cássia Maria Lie Ugaya, José Adolfo de Almeida Neto e Maria Cléa Brito de Figueiredo. Brasília, DF: Ibict, 2019.
- RESENDE, J. D. *Avaliação do ciclo de vida ambiental e econômica de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto envolvendo wetlands construídos*. 2018. 183 f. Tese (Doutorado em Sustentabilidade). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- SABEEN, A. H.; NOOR, Z. Z.; NGADI, N.; ALMURAISSY, S.; RAHEEM, A. B. Quantification of environmental impacts of domestic wastewater treatment using life cycle assessment: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 190, p. 221-233. 2018.
- UNIVERSITEIT LEIDEN. CML-IA Characterisation Factors. 2016. Disponível em <<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors#getting-and-using-the-database>>. Acesso em: 14 fev. 2020.
- ZHANG, Z.; WILSON, F. Life-cycle assessment of a sewage-treatment plant in South-East Asia. *Water and Environment Journal*, v. 14, p. 51-56, 2000.