

Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos

A critical review of the literature on the application of Life Cycle Assessment to wastewater treatment

- **Data de entrada:**
17/03/2016
- **Data de aprovação:**
03/10/2016

Thais Andrade de Sampaio Lopes* / Asher Kiperstok / Viviana Maria Zanta / Luciano Matos Queiroz

DOI:10.4322/dae.2017.005

Resumo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que avalia de forma abrangente os potenciais impactos ambientais associados a um produto ou serviço. Este artigo é uma revisão da literatura baseada em publicações científicas dos bancos de dados internacionais, nos anos de 1998 e 2013, sendo analisados 15 artigos que aplicaram a ACV em sistemas de tratamento de esgotos. A maioria dos artigos considera a realidade europeia e conclui que quanto maior o grau de sofisticação requerido durante a operação das estações de tratamento de esgoto (ETE), maiores os impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos sistemas de tratamento de esgotos. Assim, destaca-se a incipiente aplicação de ACV na área de tratamento de esgotos no Brasil. O uso da ACV pode auxiliar na identificação dos potenciais impactos associados ao tratamento de esgotos, além do lançamento de esgotos tratados em corpos hídricos, auxiliando na tomada de decisão quanto à definição dos arranjos tecnológicos aplicados às ETE.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Esgoto doméstico. Estações de Tratamento de Esgoto.

Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that allows evaluating environmental potential impacts associated with a product or service. This article presents a critical review of the literature based on scientific publications in international databases between the years 1998 and 2013 on the application of Life Cycle Assessment to wastewater treatment plants (WWTP), 15 papers that applied LCA to evaluate WWTP were analyzed. Most papers consider the European reality and conclude that the environmental impacts from WWTP are related to the high levels of treatment required resulting in an increase of the operational complexity. Thus, highlighting the incipient application of the LCA in wastewater treatment systems in Brazil. LCA can help to identify potential environmental impacts associated with wastewater treatment systems and also the discharge of treated wastewater into water bodies, assisting in decision making regarding the technologies of treatment used in the WWTP.

Keywords: Life Cycle Assessment. Domestic wastewater. Wastewater treatment plants.

Thais Andrade de Sampaio Lopes – Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente da UFBA.

Asher Kiperstok – PhD em Engenharia Química/Tecnologias Ambientais pela University of Manchester Institute of Science and Technology. Professor Associado IV do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA.

Viviana Maria Zanta – Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC (Escola de Engenharia de São Carlos) da USP (Universidade de São Paulo). Professora Associada III do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA.

Luciano Matos Queiroz – Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da USP. Professor Adjunto IV do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA.

***Endereço para correspondência:** Escola Politécnica da UFBA, Rua Aristides Novis, 02, 4º andar, Departamento de Engenharia Ambiental, Federação, Salvador, Bahia, CEP: 40.210 -630. E-mail: lopestas@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias de tratamento de esgotos domésticos possuem diferentes características e desempenhos e geram diferentes impactos no ambiente. Alguns processos de tratamento de esgotos apresentam alto consumo energético ou usam materiais com alta carga energética embutida; outros ocupam uma extensa área de terra. A minimização dos impactos ambientais é uma das funções das ETE, portanto deveria ser concebida de modo que os impactos globais sobre o meio ambiente fossem considerados, e não apenas aqueles oriundos do lançamento dos esgotos tratados nos corpos hídricos receptores (Dixon et al., 2003).

A legislação ambiental vigente na maioria dos países restringe os valores de concentrações de poluentes, nutrientes e microrganismos patogênicos com o objetivo de minimizar os impactos ambientais do lançamento de águas residuárias tratadas nos corpos hídricos naturais. Entretanto, não abrangem outros potenciais impactos ambientais que são ocasionados pela implantação, operação e retirada de operação das ETE (Foley et al., 2010).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite avaliar os potenciais impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço durante seu ciclo de vida, ou, como traduz a expressão usualmente utilizada, “do berço ao túmulo”. A partir da identificação e quantificação das entradas e saídas de materiais e energia, avalia os aspectos ambientais associados aos potenciais impactos e identifica oportunidades de melhorias ambientais (Setac, 1993).

No caso dos processos de tratamento de esgotos, a ACV trata com abrangência as questões ambientais e permite avaliar de forma holística os aspectos ambientais e potenciais impactos associados, gerando informações que podem auxiliar na escolha de tecnologias pelos tomadores de

decisão e identificar pontos críticos dos processos (Lopsik, 2013).

O uso da ACV aplicada a estudos na área de saneamento, sobretudo no tratamento de esgotos, ainda é incipiente, de fato, não há muitos trabalhos publicados com aplicação rigorosa da técnica nessa área no Brasil e na América Latina. No entanto, na comunidade científica internacional, sobretudo na Europa, por meio do incentivo da *International Water Association* (IWA), trabalhos e estudos para a avaliação de desempenho de ETE aplicando a técnica de ACV são frequentemente realizados (Tillman et al., 1998; Hospido et al., 2007; Gallego et al., 2008; Foley et al., 2010; Fuchs et al., 2011; Lopsik, 2013).

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão crítica da literatura sobre a aplicação de ACV no processo de tratamento de esgotos domésticos. A partir dessa revisão, foram levantados os principais pontos abordados nos artigos estudados, tais como: o objetivo, o escopo, o método e o *software* utilizado, as categorias de impacto analisadas e os resultados. Encontraram-se 15 artigos publicados entre os anos de 1998 e 2013. A abrangência temporal (quinze anos) visou analisar a evolução metodológica dos estudos de ACV aplicados às ETE.

A metodologia utilizada foi a busca e análise de artigos, usando como palavras-chave para a pesquisa os termos: “*Wastewater Treatment Plants*” (WWTP), “*Life Cycle Assessment*” (LCA), “*Life Cycle Inventory* (LCI), “*UASB Reactor*”, “*Constructed Wetlands*” e “*Activated Sludge*” com o objetivo de encontrar artigos científicos sobre o tema nas principais bases de dados internacionais, como: *Science Direct*, *Springer Link*, *IWA Publishing* e *ACS Publications*.

Apenas artigos publicados na língua inglesa foram incluídos na presente revisão. Como principal critério de determinação da relevância das publicações utilizou-se o número de citações. Dentre

os autores mais citados estão: Dixon et al., 2003; Foley et al. 2007; Gallego et al., 2008; Hospido et al., 2008; Renou et al., 2008. A partir desses critérios aplicados foram destacados 15 artigos que avaliam o desempenho ambiental de ETE aplicando a ferramenta ACV.

Diferentes tecnologias e tipos de cenário que envolvem combinação de várias fases de tratamento de esgotos foram avaliados, incluindo as seguintes etapas: ACV da etapa de coleta dos esgotos (rede coletora), recalque (bombeamento), e tratamento de esgotos (Tillman et al., 1998), tratamento de esgotos incluindo as fases de construção, operação e demolição (Renou et al., 2008; Weiss et al., 2008), construção ou operação das ETE (Dixon et al., 2003; Foley et al., 2007; Lundin et al., 2000) e, por fim, somente a fase de operação da ETE (Gallego et al., 2008; Hospido et al., 2008).

2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA: DEFINIÇÕES E ASPECTOS NORMATIVOS

A ACV é uma ferramenta de gestão ambiental que permite avaliar os fluxos de entrada e saída envolvidos em um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, e quaisquer alterações no meio ambiente, negativas ou positivas, que resultem das etapas de um sistema ou processo. Pode abranger desde a fase de desenvolvimento do produto até seu destino final ou reciclagem, analisando a questão ambiental de forma holística capaz de atender as técnicas de prevenção da poluição (Rodrigues et al., 2008).

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), o estudo de ACV compreende quatro fases iterativas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Na fase de definição de objetivo e escopo são fixados os propósitos e amplitudes, a fronteira do estudo

e a unidade funcional. Na análise de inventário de ciclo de vida (ICV) deve-se proceder ao levantamento de dados e à quantificação de entradas e saídas de matéria e energia. Na etapa de avaliação de impacto (AICV), os dados e informações gerados são associados às categorias de impacto. Por fim, na fase de interpretação, os dados obtidos são combinados e analisados de acordo com os objetivos pré-definidos.

A ACV é uma ferramenta que fornece base para a adoção de medidas mitigadoras preventivas ou corretivas, preconizadas pela produção mais limpa. Torna-se importante para a tomada de decisão e como subsídio para a compreensão de temas como: gerenciamento e preservação de recursos naturais, identificação de pontos críticos e otimização de sistemas, desenvolvimento de novos serviços e produtos, otimização de reciclagem mecânica e energética, além de definir parâmetros para a rotulagem ambiental de produtos (Coltro, 2007).

Há limitações, porém, em todas as fases da ACV, que devem ser examinadas e aprimoradas pelos pesquisadores e profissionais envolvidos nessa área do conhecimento. Na definição do Objetivo e Escopo, os problemas são a escolha da unidade funcional, a delimitação da fronteira do sistema, considerações relativas a impactos econômicos e sociais e análise de cenários alternativos. Durante a fase de elaboração do Inventário são: a alocação, os critérios de definição de aspectos representativos ou desprezíveis, ausência de dados reais e as considerações sobre especificidades técnicas locais. Na AICV, as complicações acontecem na definição dos métodos de avaliação e das categorias de impacto e a representatividade local. Na Interpretação, os pesquisadores devem ficar atentos à ponderação e à avaliação e à incerteza nos processos de decisão (Reap et al., 2008).

3 APLICAÇÃO DA ACV NO TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) vem sendo utilizada no mundo, com maiores publicações na Europa, para avaliar os potenciais impactos ambientais associados a sistemas de esgotamento sanitário, mostrando-se uma ferramenta válida para identificar de forma abrangente os impactos ambientais envolvidos na implantação, construção e operação de ETE.

Desse modo, Fuchs et al. (2011) utilizaram a ACV para comparar o impacto ambiental de *wetlands* construídos de fluxo vertical e horizontal, incluindo as emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, compararam os *wetlands* construídos com sistemas convencionais de tratamento considerando a aquisição de materiais, montagem e operação. O estudo concluiu que os *wetlands* apresentam menor impacto ambiental em termos de consumo de recursos e emissão de gases de efeito estufa. Adicionalmente, foi possível concluir que *wetlands* construídos de fluxo vertical são menos impactantes para a remoção de nitrogênio do esgoto doméstico.

Os resultados de um estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) realizado por Foley et al. (2010), considerando diferentes cenários, indicaram que o aumento das eficiências de remoção de nitrogênio e fósforo elevam as emissões (gases de efeito estufa para atmosfera e lodo biológico de processo) e o consumo de recursos (energia, infraestrutura, produtos químicos). Essas evidências mostraram o aumento da carga de impactos ambientais negativos à custa de uma melhor qualidade do efluente. Esse resultado evidencia a importância do desenvolvimento de processos de segregação e aproveitamento de nutrientes pre-

sentes nas correntes que compõem o esgoto doméstico, antes da sua chegada às ETE.

Gallego et al. (2008) aplicaram ACV para analisar os impactos ambientais de diferentes tecnologias de tratamento de esgotos em pequenas populações. Os resultados foram expressos, principalmente, em duas categorias de impacto: eutrofização devido à presença de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica no efluente tratado e ecotoxicidade terrestre, devido à presença de metais pesados presentes no lodo do processo.

O consumo de energia tem uma contribuição relevante sobre os potenciais impactos, mostrando que tratamentos com aeração forçada apresentaram maior potencial de impacto ambiental. Além disso, os estágios de maior contribuição ao longo do ciclo de vida da ETE foram: descarte do efluente tratado, operação e, em menor proporção, a implantação do sistema.

A Tabela 01 mostra o resumo dos artigos com a aplicação de ACV no tratamento de esgoto, com o autor, ano e local, objetivos e tecnologias, escopo, fronteira e unidade funcional (UF), métodos de avaliação e *software* utilizado e os resultados obtidos nesses estudos, de acordo com as fases da metodologia da ACV.

Constata-se na Tabela 01 que os artigos buscam comparar sistemas ou tecnologias de tratamento de esgoto usando a ferramenta de ACV. Alguns compararam sistemas convencionais com alternativas de saneamento ecológico com segregação de correntes; outros compararam sistemas de atendimento em grande escala com de pequena escala.

Tabela 01 – Resumo de artigos publicados aplicando ACV no tratamento de esgoto

Nº	Referência (Local)	Objetivo	Escopo	Método/ Software	Categorias de impacto	Resultados
1	Tillman et al., (1998) (Suécia)	Comparar dois cenários alternativos de coleta, transporte e tratamento de esgotos.	(1) Rede coletora, tratamento, digestão, secagem do lodo e filtros de areia. (2) Segregação de corrente, urina como fertilizante; lodo para agricultura; água cinza tratada em filtros. U.F: 1 PE durante 1 ano.	Somente ICV.	Somente ICV.	Ambos cenários com menor impacto do que o existente, e a segregação com menor impacto. Menor consumo de energia para o sistema existente. Emissões para o ar menores para os dois cenários.
2	Lundin, et al., (2000) (Suécia)	Comparar o tratamento convencional, em grande e pequena escala, com a separação da urina e a compostagem da água negra.	Operação do sistema convencional em grande escala com separação da urina. Construção e operação em pequena escala e da compostagem. Inclui: coleta, tratamento e transporte químicos e materiais, energia e fertilizantes. U.F: 1 PE durante 1 ano.	Somente ICV.	Somente ICV.	O sistema em larga escala é melhor para a construção e operação. A separação da urina é eficiente na reciclagem de nutrientes para a agricultura. Sistema em larga escala com separação da urina é vantajoso.
3	Dixon et al., (2003) (Reino Unido)	Avaliar o impacto ambiental da construção e operação dos <i>wetlands</i> e compará-los a uma tecnologia convencional. Tecnologias: <i>wetland</i> construído e filtro aerado.	Aplicação hipotética de tratamento fornecida por uma empresa. Inclui: materiais, transporte e operação, manufatura e implantação. Sem o fim-de-vida. U.F: PE (1PE =0,2 m³/dia).	SimaPro	Uso de energia, emissão de CO ₂ , emissão sólida e uso do solo.	O consumo de energia é similar. O transporte para a construção e a operação tem maior consumo de energia e emissão de CO ₂ . O impacto do <i>wetland</i> é reduzido se o solo escavado for usado no leito.
4	Machado et al., (2006) (Portugal)	Comparar o impacto de 3 sistemas para pequenas populações. Tecnologias: <i>wetland</i> construído, infiltração lenta e lodo ativado.	Construção, implantação, operação, manutenção, fim-de-vida e disposição final. Inclui os materiais, os combustíveis e os processos envolvidos durante 20 anos. U.F: 100 PE.	CML 2 Baseline 2000/ SimaPro.	AD, GW, OLD, HT, TE, PO, AC, EU.	<i>Wetland</i> e infiltração apresentam menor uso de materiais na construção, baixo uso de energia na operação e absorção de CO ₂ .
5	Hospido et al., (2007) (Espanha)	Avaliar 4 ETE para até 125.000 hab. Tecnologias: tratamento primário e secundário, digestão anaeróbia e desidratação do lodo com aplicação no solo.	Leva em consideração: existência de tratamento secundário, digestão anaeróbia e diferentes tipos de desidratação do lodo. U.F: 1 PE.	CML 2 2002/ SimaPro 5.1	EU, OLD, GW, AC, PO, AD, HT, MAE, TE, FWAE.	Alto consumo de energia no tratamento secundário. A descarga de NH ₃ e P é o mais impactante para categoria de EU. A digestão anaeróbia reduz o impacto da aplicação do lodo no solo.
6	Gallego et al., (2008) (Espanha)	Analisar diferentes ETE para pequenas populações. Tecnologias: anaeróbio-aeróbio-anóxico, aeróbio-anóxico e aeração prolongada.	Subsistemas: pré-tratamento e tratamento primário, tratamento secundário, tratamento do lodo, uso e transporte do lodo. Para construção e operação. U.F: PE.	CML 2 Baseline 2000 /SimaPro 6.0	AD, GW, OLD, TE, PO, AC, EU.	Principais categorias: EU e TE. Aeração prolongada aumenta o consumo de energia. Etapas de maior contribuição: descarga de água, operação e em menor escala a implantação do sistema.
7	Renou et al., (2008) (França)	Avaliar os métodos de AICV. Tecnologias: tanque anaeróbio, lodo ativado, clarificação.	Inclui: tratamento do efluente e do lodo, produção e transporte de químicos, produção de energia, resíduos e transporte do lodo. U.F: volume de esgoto tratado em um ano.	CML 2000, Eco Indicador 99, EDIP 96, EPS, Ecopoints 97/ SimaPro 5.	AC, EU, RD, GHE, HT.	Consistência entre os métodos para GEE, depleção dos recursos naturais e AC. Atenção especial para a toxicidade humana devido às discrepâncias entre os métodos.
8	Weiss et al., (2008) (Suécia)	Compara os impactos e o uso de recursos naturais. Tecnologias: infiltração, precipitação química e filtros específicos para remoção de P.	Inclui: extração da matéria-prima, produção de materiais, operação do sistema, disposição e reciclagem dos resíduos. Inclui: uso de energia, recursos, emissões para o ar e água. U.F: 1 PE por/ano.	AICV: classificação, caracterização, normalização.	AD, GW e EU.	A precipitação química é mais favorável para a conservação ambiental e dos recursos. Os filtros reduzem a EU, mas têm alto consumo de energia. A infiltração tem baixo impacto, exceto para EU.

Tabela 01 – Resumo de artigos publicados aplicando ACV no tratamento de esgoto

Nº	Referência (Local)	Objetivo	Escopo	Método/ Software	Categorias de impacto	Resultados
9	Hoibe et al., (2008) (Dinamarca)	Avaliação ambiental de tecnologias de tratamento. Tecnologias: filtro de areia, ozônio e biorreator de membrana (MBR).	Inclui: materiais de construção, energia para a operação, disposição do lodo e emissões, além de metais pesados, disruptores endócrinos e detergentes presentes no efluente. UF: 1 m ³ de esgoto tratado.	EDIP	GW, AC, EU e FWAE.	Os filtros de areia são mais vantajosos pelo baixo consumo de energia e alta eficiência na remoção de metais pesados.
10	Benetto et al., (2009) (Luxemburgo)	Comparar o saneamento ecológico (Ecosan) com sistema convencional em um edifício comercial. Tecnologias: segregação de correntes, águas marrons, amarelas e cinzas.	Inclui: compostagem da parte sólida para o campo; estocagem das águas amarelas para o campo; águas cinzas tratadas em <i>wetlands</i> ; incineração do lodo. UF: esgoto gerado por 40 trabalhadores em 220 dias/ano.	Umberto 5.5 para o ICV.	Demanda Cumulativa Exergética, EU, AC, GW e as categorias de <i>endpoint</i> .	Ecosan reduz o impacto no ecossistema, mas apresenta impacto nos recursos, saúde humana e mudança climática, promissor em pequena escala.
11	Foley et al., (2010)	ICV de dez cenários. Tecnologias: reator anaeróbio, lodo ativado, remoção biológica de nutrientes e lagoa de estabilização.	Inclui: geração do esgoto até descarte, emissões para o ar, energia e químicos, para a construção e operação. UF: 10 mL/dia (5000 kg de DQO/dia, 500 kg N/dia, 120 kg/dia) em 20 anos.	Somente ICV.	Somente ICV.	Maior remoção de N e P aumenta as emissões (GEE e lodo) e o consumo de recursos (energia, infraestrutura e químicos). Quanto melhor a qualidade do efluente final, maiores os impactos.
12	Roux et al., (2010) (França)	ACV de três sistemas com mesma carga de DBO para uma rede de esgoto usando dados do <i>Ecoinvent</i> . Tecnologias: <i>wetland</i> e sistema de lodo ativado.	Dois sistemas excluem o tratamento do lodo gerado. O terceiro sistema é a descarga do esgoto bruto sem tratamento. Todos incluem a rede coletora. UF: Carga orgânica nominal diária (kg DBO).	CML midpoint Ecoindicator SimaPro	AD, GW, OLD, HT, FWAE, MAE, TE, AC, EU.	Os <i>wetlands</i> têm menor impacto em todas as categorias, exceto para EU. A rede coletora apresenta grande impacto em todas as categorias, menos para EU.
13	Fuchs et al., (2011) (EUA)	Comparar <i>wetlands</i> quanto à emissão de GEE e com sistemas convencionais quanto aos materiais, montagem e operação. Tecnologia: <i>wetlands</i> .	Tanque séptico seguido de <i>wetlands</i> incluindo uso da terra, solo, vegetação, forro, coleta de esgoto e transporte. UF: 400 PE em 50 anos, com efluente de 5 mg/L NH ₄ ⁺ - N. 1 PE = 150 L/dia de esgoto.	Ecoindicator 99, CML 2/ Baseline 2000 SimaPro 7.0	Categorias de <i>endpoint</i> . <i>Midpoint</i> : AC, EU, GW, OLD.	Os <i>wetlands</i> apresentam menor impacto ambiental em termos de consumo de recursos e emissão de GEE.
14	Lopsik K., (2013) (Estônia)	Avaliar os impactos ambientais de duas tecnologias usando ACV. Tecnologias: <i>wetland</i> construído e lodo ativado aeração prolongada.	Inclui: sistema de esgoto, materiais de construção, uso da terra, uso de eletricidade, uso de químicos e os parâmetros de descarga do efluente tratado, para a construção e operação. UF: 1 PE (60 g de DBO/h) durante 15 anos de operação.	Impact 2002 + e Receita/ SimaPro Faculty 7.2	Todas as categorias de <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> .	O principal impacto do <i>wetland</i> é no uso de agregado leve de argila expandida. Os impactos do lodo ativado são no uso de energia e no efluente final, durante a operação.
15	Padilla et al., (2013) (México)	ACV de três cenários de tratamento com baixa, média e alta vazão. Tecnologias: lodo ativado convencional e com aeração prolongada.	Tratamento do esgoto, dos resíduos sólidos e do lodo, inclui os materiais e energia, emissões atmosféricas, resíduos sólidos e disposição do lodo, para a operação. UF: 1 m ³ de esgoto em 20 anos.	CML2000/ SimaPro.	AD, AC, GWP 100, EU, PO, OLP, HT, TE.	O maior impacto no tratamento do esgoto é para GW e TE, devido ao uso de energia. A disposição dos resíduos contribui mais para OLD.

Legenda: População Equivalente (PE), Unidade Funcional (UF) e Gases de Efeito Estufa (GEE). Categorias de Impacto: Depleção Abiótica (AD), Aquecimento Global (GW), Depleção da Camada de Ozônio (OLD), Toxicidade Humana (HT), Ecotoxicidade Aquática Água Doce (FWAE), Ecotoxicidade Marinha (MAE), Ecotoxicidade Terrestre (TE), Oxidação Fotoquímica (PO), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Depleção dos Recursos (RD) e Gases de Efeito Estufa (GHE).

4 DISCUSSÃO

A análise dos artigos publicados mostra que os estudos de ACV aplicados no tratamento de esgoto vêm avançando ao longo do tempo. Os dois primeiros artigos apresentados em ordem cronológica só fizeram estudos de ICV, e os demais já avançaram para estudos completos de ACV. Entretanto, isso não diminui a importância de estudos de ICV na área de tratamento de esgotos, pois a coleta de dados é a parte mais laboriosa na ACV, além da importância da geração de informações para os bancos de dados.

Os estudos de ICV de sistemas de tratamento de esgoto para a realidade brasileira ainda são muito incipientes, o que os torna de extrema importância para compor um banco de dados nacional. O banco de dados mais utilizado nos estudos de ACV, o Ecoinvent®, não traz dados de processos de tratamento em escala real para o Brasil e para a América Latina.

A utilização dos *softwares* e inclusão das categorias de impacto, tanto de *midpoint* como de *endpoint*, vem aumentando dentro dos estudos de ACV para o tratamento de esgotos, já que essa ferramenta facilita a determinação dos impactos envolvidos. Destaca-se o *software SimaPro®* como o mais utilizado nos estudos revisados e as categorias de impacto de *midpoint* sendo mais avaliadas do que as categorias de *endpoint*.

Os artigos analisados que comparam sistemas convencionais de tratamento com alternativas de segregação de correntes mostram que, em pequena escala, a segunda opção gera menores impactos ambientais e uma melhor eficiência para a reciclagem de nutrientes. Sistemas com separação da urina podem ser especialmente vantajosos, principalmente quando se incluem os efeitos da produção industrial de fertilizantes nitrogenados.

Os artigos que comparam diferentes tecnologias de tratamento de esgoto concluem que, devido ao alto consumo de energia, a tecnologia de lodo ativado

apresenta maior impacto do que reatores anaeróbios e filtros percoladores. Já os *wetlands* construídos podem apresentar menor impacto ambiental em todo o seu ciclo de vida do que tecnologias mais sofisticadas, devido ao menor consumo de materiais e energia, e emissões de gases de efeito estufa. A comparação entre *wetlands* concluiu que os de fluxo vertical são menos impactantes para a remoção de nutrientes que os de fluxo horizontal.

Quanto ao ciclo de vida do tratamento de esgotos, a maioria dos estudos conclui que a fase de operação é mais impactante que a construção, e consideram o impacto da fase de desconstrução (fim-de-vida) insignificante em relação às outras fases. Entretanto, destacamos que a fase de construção não deve ser esquecida, devendo ser analisada sempre que houver dados disponíveis na literatura ou de projeto. Park et al. (2003) enfatiza que a infraestrutura, como as edificações e as instalações dos sistemas de tratamento, tem características diferentes do produto final, que é o efluente tratado, e, por isso, deve ser inserida na avaliação dos potenciais impactos envolvidos ao longo do ciclo de vida das ETE.

A análise dos artigos aponta a escolha da fronteira do sistema como uma das limitações da ferramenta, ou seja, quais processos devem ser incluídos no estudo, desde a rede coletora até o descarte final no corpo hídrico receptor ou incluir somente a ETE. Outra limitação é a escolha da unidade funcional (UF), principalmente quando se pretende comparar diferentes cenários ou quando se usam dados locais. Hospido et al. (2007) aponta como uma boa escolha o volume de esgoto tratado por um período de tempo desde que se baseie em dados reais. Já para estudos comparativos, pode ser mais representativo usar a População Equivalente (PE), relativo à carga orgânica do esgoto expressa pela razão entre massa de matéria orgânica e tempo.

Observa-se que a maioria dos trabalhos foi realizada no continente europeu, o que pode estar relacionado à Diretiva Europeia 91/271/ECC, que esta-

beleceu que todo efluente gerado em populações entre 10.000 e 15.000 PE deve ser tratado em nível secundário. Essa determinação trouxe um desafio para as autoridades europeias envolvidas com a gestão de esgotos, principalmente com relação à definição das tecnologias de tratamento de esgoto para pequenas comunidades (Gallego et al., 2008).

Esse fato ajuda a explicar o aumento do número de estudos ambientais sobre diferentes tecnologias de tratamento de esgotos realizados na Europa e o aumento do número de publicações nessa área, a partir do ano de 2006 (prazo final da Diretiva Europeia 91/271/ECC), o que demonstra a importância da ACV como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão cada vez mais aceita para analisar o desempenho ambiental das ETE.

Considerando o enorme desafio de elevar os níveis de atendimento dos serviços de esgotamento sanitário nos países em desenvolvimento, fica evidente a importância do incentivo à realização de maior número de estudos de ACV na área de esgotamento sanitário nas outras regiões do planeta, sobretudo com o objetivo de identificar os potenciais impactos ambientais respeitando as diferenças climáticas, culturais, tecnológicas, sociais e financeiras. O desafio para o desenvolvimento desses estudos é, principalmente, a construção e acesso a bancos de dados confiáveis, que reflitam a realidade local e permitam o aperfeiçoamento da aplicação da ACV e de métodos de avaliação de impacto.

Outro aspecto não menos relevante é a criação e o acesso a *softwares* livres para a realização de ACV. Os trabalhos levantados mostram a extensa utilização de *softwares* registrados cujo acesso possui custos elevados de aquisição para muitos grupos de pesquisa, sobretudo nos países em desenvolvimento. Esse fato ajuda a explicar a relevância da realização de estudos de ICV que não alcançam uma aplicação rigorosa da técnica. Assim, o incentivo aos estudos para identificar os potenciais impactos respeitando a realidade local para auxiliar

na tomada de decisão pelas partes envolvidas na área de esgotamento sanitário se faz necessário.

Considerando a realidade brasileira, a Rede Nacional de Pesquisa sobre Tratamento de Esgotos Descentralizados (Rented), financiada pela Finep - Inovação e Pesquisa, empresa pública vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Governo Federal, tem como um dos objetivos a aplicação da ACV em sistemas de tratamento de esgotos descentralizados que atendem a populações de pequeno porte. Essa iniciativa pode ser caracterizada como um marco do início da preocupação por parte dos especialistas em esgotamento sanitário com a avaliação holística de desempenho ambiental das ETE.

Assim, o presente estudo reforça a importância da inserção da ACV como uma ferramenta de avaliação de impacto e desempenho ambiental de ETE para auxiliar na tomada de decisão desde o planejamento, implantação e operação, incluindo a escolha das tecnologias adotadas e o grau de tratamento necessário.

5 CONCLUSÕES

A aplicação rigorosa da ACV para avaliar os potenciais impactos ambientais associados às estações de tratamento de esgotos ainda é incipiente na maior parte dos continentes.

A maioria dos estudos concluiu que, quanto maior o grau de tratamento, maiores são os impactos ambientais associados ao ciclo de vida. Evidenciando a carga de impactos ambientais negativos à custa de uma melhor qualidade do efluente final visando à proteção dos cursos d'água.

Recomenda-se o fortalecimento de uma cultura de concepção de projetos de sistemas de esgotamento sanitário que incorpore os aspectos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida e permita uma tomada de decisão mais racional e alinhada com os princípios da preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009.
- BENETTO E. et al. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. In: **Science of the Total Environment**, 407, pp.1506 - 1516.
- COLTRO, L. (org.) (2007). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL.
- DIXON A., SIMON M., BURKITT T. (2003). Assessing the environmental impact of two options for smallscale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. **Ecological Engineering** 20, 297- 308.
- FOLEY J., DE HAASA D., HARTLEYB K., LANT P. (2010). Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. **Water Research**, 44, 1654 - 1666.
- FUCHS V.J., MIHELICIC J.R., GIERKE J.S. (2011). Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. **Water Research**, 45, 2073 - 2081.
- GALLEGO A., HOSPIDO A., MOREIRA M.T., FEIJOO G. (2008). Environmental performance of wastewater treatment plants for small populations. **Resources, Conservation and Recycling**, 52, 931-940.
- HOIBYE L. et al. (2008). Sustainability assessment of advanced wastewater treatment Technologies. **Water Science & Technology**, 58, 963-968.
- HOSPIDO A., MOREIRA M.A., FEIJOO G. (2007). A Comparison of Municipal Wastewater Treatment Plants for Big Centres of Population in Galicia (Spain). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 13, 57-64.
- LOPSIK K. (2013). Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 10, 1295-1308.
- LUNDIN M., BENGTSSON M., MOLANDER S. (2000). Life Cycle Assessment of Wastewater Systems: Influence of System Boundaries and Scale on Calculated Environmental Loads. **Environmental Science and Technology**, 34, 180-186.
- MACHADO A.P. et al (2006). Life Cycle Assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities: energy-saving systems versus activated sludge. In: PROCEEDINGS OF 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLAND SYSTEMS FOR WATER POLLUTION CONTROL. IWA.
- PADILLA F.H. (2013). LCA as a tool of decision making process for the environmental improvement of wastewater treatment in Latin American and the Caribbean: the case of activated sludge technology. Proceedings of the 5th International Conference on Life Cycle Assessment - CILCA.
- PARK K. et al (2003) Quantitative Assessment of Environmental Impacts on Life Cycle of Highways. **Journal of Construction Engineering Management**. 129 (1), p. 25-31.
- REAP J., ROMAN F., DUNCAN S., BRAS B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. 13, 290- 300.
- RENOU S., THOMAS J.S., AOUSTINA E., PONS M.N. (2008). Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. **Journal of Cleaner Production**, 16, 1098-1105.
- RODRIGUES C.R.B., ZOLDAN M.A., LEITE M.L.G., OLIVEIRA I.L. (2008). Sistemas computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do produto (ACV). In: **Anais do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável**.
- ROUX P., BOUTIN C., RISCH E., HEDUIT A. (2010). Life Cycle environmental Assessment (LCA) of sanitation systems including sewerage: Case of vertical flow constructed wetlands versus activated sludge. In: 12th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, 2, 879 - 887.
- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC). (1993). **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"**. Sesimbra, Portugal.
- TILLMAN A.M., SVINGBY M., LUNDSTRÖM H. (1998). Life Cycle Assessment of Municipal Waste Water Systems. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 3, 145 - 157.
- WEISS P., EVEBORN D., KÄRRMANA E., GUSTAFSSON J.P. (2008). Environmental systems analysis of four on-site wastewater treatment options. **Resources, Conservation and Recycling** 52, 1153-1161.