

Análise da aplicação da ACV em estações de tratamento de efluentes

Efluentes domésticos estão dentro dos poluentes lançados na natureza que causam uma depleção significativa do oxigênio dos cursos d'água e também contribuem nos impactos regionais como globais. A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma poderosa metodologia utilizada para avaliar o desempenho ambiental de produtos e serviços e tem-se aplicado para analisar os impactos potenciais os sistemas de tratamento de águas residuais. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar a aplicação da ACV na avaliação dos sistemas de tratamentos de águas residuais. Os resultados mostraram um interesse crescente no uso da ACV, juntamente com outras análises como os custos de operação, construção e recuperação de energia para o processo de tomada de decisão. Esta avaliação integrativa dos sistemas de tratamento de águas residuais permite obter um perfil mais confiável das tecnologias. No entanto, pode ser notado que devem ser colocados mais atenção para descrever melhor as decisões tomadas durante o estudo da ACV. Definições relevantes durante a fase de objetivo e escopo de uma ACV, por exemplo, unidade funcional, e as fontes de dados na fase de inventário estavam faltando em alguns dos trabalhos analisados nesta revisão bibliográfica. Essas informações são essenciais para assegurar a transparência do estudo ACV bem como aumentar confiabilidade dos resultados.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de vida; ACV; tratamento de efluentes; impactos ambientais.

Analysis of the LCA application in environmental assessment of wastewater treatment plants

Domestic effluents are pollutants released in the environment with significant potential to cause oxygen depletion in watercourses and also contribute to regional and global impacts. The life cycle assessment (LCA) is a powerful methodology to evaluate the environmental performance of products and services and has been applied to analyze the potential impacts of wastewater treatment plants. Therefore, the aim of this study was to analyze the application of LCA in the assessment of wastewater treatment systems. The results showed a growing interest in the use of the LCA along with other analysis, such as the costs of operation, construction and the energy recovery for the decision making process. This integrated evaluation of the wastewater treatment systems allows a more reliable profile of the technologies. However, it could be noticed that more attention should be placed to better describe the decisions made during the LCA study. Relevant definitions during the goal and scope phase of an LCA, e.g. functional unit, and the data sources in the inventory phase were missing in some of the works evaluated in this bibliographic review. These information are essential to provide transparency of the LCA study, increasing the reliability of the results.

Keywords: Life Cycle Assessment; LCA; wastewater treatment; environmental impacts.

Topic: **Engenharia Sanitária**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Received: **20/03/2016**

Approved: **10/08/2016**

Karlan Rau

Instituto Federal Catarinense, Brasil
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4159111199668131>
karlan.rau@posgrad.ufsc.br

Edivan Cherubini

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1934641801092921>
edivan.cherubini@posgrad.ufsc.br

Sebastião Roberto Soares

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6836118878721633>
sr.soares@ufsc.br

Paulo Belli Filho

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3239996547346125>
paulo.belli@ufsc.br

Rejane Helena Ribeiro da Costa

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6762004196316452>
rejane.costa@ufsc.br



DOI: 10.6008/SPC2179-6858.2016.003.0009

Referencing this:

RAU, K.; CHERUBINI, E. SOARES, S. R.; PAULO FILHO, B.; COSTA, R. H. R. Análise da aplicação da ACV em estações de tratamento de efluentes. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.7, n.3, p.100-110, 2016. DOI: <http://doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2016.003.0009>

INTRODUÇÃO

Os efluentes domésticos são águas residuais caracterizadas por conter uma grande quantidade de material orgânico, responsável por significativa depleção de oxigênio nos cursos d'água, contribuição de sólidos, organismos patogênicos e nutrientes que podem causar eutrofização (JORDÃO et al., 2011) dentre demais impactos a nível regional como também na escala global.

Recentemente, a sociedade moderna se tornou mais preocupada com assuntos como a depleção de recursos naturais e os impactos ambientais de suas atividades (KALAKUL et al., 2014). Muitas indústrias e empresas têm prestado mais atenção às atividades que afetam o meio ambiente, indicando que a análise ambiental se tornou um fator importante para a busca por tecnologias mais sustentáveis e eficientes.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que considera e quantifica o consumo de recursos e os impactos ambientais associados a um produto, processo ou sistema durante o seu ciclo de vida, colaborando para uma melhor avaliação do desempenho global e das contribuições relativas para diferentes fases do ciclo de vida, permitindo assim a indicação do desempenho global dos sistemas (BENETTO et al., 2009).

Os primeiros estudos abordando o uso da ferramenta ACV em sistemas de tratamento de esgoto têm início na década de 1990 (GUTIERREZ, 2014). A partir desta década, inúmeros trabalhos e artigos foram produzidos com diversos interesses tais como identificar os principais fatores de impacto dentro de processos específicos (ver KALBAR et al., 2013) o intuito de avaliar os impactos gerados pelas estações de tratamento de efluentes (ETE) (BISINELLA DE FARIA et al., 2015), obter informações para melhorar a gestão das estações desde a sua construção a sua operação (WU et al., 2010; YU et al., 2009), como também utiliza-lo como referência para escolher qual sistema é mais adequado para uma determinada situação (GARRIDO-BASERBA et al., 2014) como também identificar qual a melhor fim-de-vida para o lodo produzido nas ETE (USAPEIN et al., 2015) ou mesmo utilizar vários subprodutos como fonte de energia (HIGGINS et al., 2012; LEE et al., 2012; LOPSIK, 2013; WU et al., 2010). Sob este aspecto, este artigo será construído com o objetivo de caracterizar e analisar artigos que utilizam a técnica de ACV para avaliar sistemas de tratamentos de efluentes.

Deste modo, este artigo tem como objetivo analisar a aplicação da ACV na avaliação dos sistemas de tratamentos de efluentes.

A importância desta temática pode ser percebida no relato de Tourinho (2014) onde cita a IWA (The International Water Association), associação que vem desenvolvendo o “Water, Climate and Energy Programme”, em conjunto a profissionais da área de energia, a fim de abordarem questões chave relacionadas às cidades e a água, tais como neutralidade de energia, redução na pegada de carbono e adaptações às mudanças climáticas. A questão mais interessante, destaca-se o apoio à transferência de tecnologias relacionadas à água urbana, em particular para os países do BRIIC, do qual fazem parte Brasil, Rússia, Índia, Indonésia e China e os chamados LAMIC (países de baixa e média renda). Além disso, recentemente, anunciou a formação de um grupo de trabalho com ACV em água e esgotos, o “IWA working group for life cycle assessment of water and wastewater treatment – LCA - Water WG” juntamente ao

Modelling and Integrated Assessment - MIA, com o objetivo de facilitar o intercâmbio de ideias e desenvolver convergências metodológicas para promover a melhor utilização da ACV no ciclo antropogênico da água (TOURINHO, 2014).

METODOLOGIA

A metodologia inicial aplicada será a revisão integrativa. Este procedimento foi escolhido por possibilitar a síntese e análise do conhecimento científico já produzido sobre o tema investigado (BOTELHO, 2011). Este método foi fundamentado em Mendes *et al*, (2008) que estipula seis etapas principais deste tipo de revisão: 1ª. Etapa: Identificação do tema e seleção da questão de pesquisa; 2ª. Etapa: Estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão de artigos e pesquisas; 3ª. Etapa: Identificação dos estudos pré-selecionados e selecionados; 4ª. Etapa: Categorização dos estudos selecionados; 5ª. Etapa: Análise e interpretação dos resultados; 6ª. Etapa: Apresentação da revisão/ síntese do conhecimento.

Em relação à primeira etapa, este projeto foi desenvolvido considerando-se estudos de ACV aplicados sobre os sistemas de tratamento efluentes. Para a busca de estudos, foi necessária a aplicação da segunda etapa, referente a critérios de seleção de inclusão e exclusão de trabalhos. Com diversas bases disponíveis no Portal de Periódicos da CAPES, definiu-se na escolha de uma base internacional e uma nacional, respectivamente: SCOPUS e SCielo.

Foram utilizados, na busca dos artigos, os seguintes descritores e suas combinações nas línguas portuguesa e inglesa respectivamente: ACV, Avaliação do ciclo de vida, LCA, *Life cycle assessment*, sistemas de tratamento de efluentes, *wastewater treatment system*, ETE, *sewage treatment*, lodo ativado, *activated sludge*, lagoas de estabilização, *stabilization ponds*, Reator anaeróbico de fluxo ascendente, UASB, zonas húmidas, *wetlands*.

Os critérios de inclusão definidos para a seleção dos artigos foram: a combinação das palavras-chave acima. Diversas combinações foram elaboradas, porém as que mais trouxeram retorno foi a seguinte combinação: "LCA + wastewater treatment system + sewage treatment", artigos na íntegra que retratassem a temática referente à revisão integrativa e artigos publicados e indexados nos referidos bancos de dados nos últimos dez anos.

A análise dos estudos selecionados, em relação ao delineamento de pesquisa, pautou-se leitura do resumo de cada artigo, com o intuito de reunir o conhecimento produzido sobre o tema explorado desta revisão. De cada artigo buscou-se extrair as seguintes informações: tecnologia de tratamento do efluente, ano, país de origem, metodologia empregada de ACV, software utilizado para os cálculos, banco de dados do inventário, categorias de impacto, unidade funcional e por fim resultados do impacto baseando em categorias *midpoint* e *endpoint*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando os critérios pré-selecionados bem como a disponibilidade de obter o artigo na íntegra, de 100 artigos obtidos na combinação de palavras-chave foram selecionados vinte e quatro publicações que

integram o grupo para a presente revisão integrativa. Os resultados obtidos na base de pesquisa SCIELO não atenderam os critérios de seleção propostos e por isso seus resultados foram desconsiderados. A Quadro 1 apresenta em números os resultados obtidos por palavras-chave e por combinações pesquisadas, enquanto o Quadro 2 apresenta os 24 artigos selecionados para a análise.

Quadro 1: Número de artigos resultantes da pesquisa realizadas nos bancos de dados por palavras-chave.

PALAVRAS-CHAVE	SCOPUS	SCIELO
ACV	10	10
Avaliação do ciclo de vida	7	5
LCA	3212	120
Life cycle assessment	8080	8
Wastewater treatment system	11269	0
Sistemas de tratamento de efluentes	0	0
ETE	274	638
Sewage treatment	13973	8
Lodo ativado	3	3
Activated sludge	6834	20
Lagoas de estabilização	8	7
Stabilization ponds	446	9
UASB	1004	70
Reator anaeróbico de fluxo ascendente	0	0
Zonas húmidas	1	1
Wetlands	23077	180
COMBINAÇÕES		
LCA + wastewater treatment system	279	0
ACV + ETE	0	0
LCA + wastewater treatment system + sewage treatment	100	0

Quadro 2: Lista dos artigos selecionados para a revisão integrativa.

Título	Ano	Autor	País
1 Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA + DEA method	2015	Lorenzo-Toja et al.	Espanha
2 Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA)	2015	Bisinella de Faria et al.	França
3 Comparison of development scenarios of a black water source-separation sanitation system using life cycle assessment and environmental life cycle costing	2014	Thibodeau et al.	Canadá
4 Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant	2014	Garrido-Baserba et al.	Espanha
5 Environmental impact of submerged anaerobic MBR (SAnMBR) technology used to treat urban wastewater at different temperatures	2013	Pretel et al.	Espanha
6 Environmental performance of biological nutrient removal processes from a life cycle perspective	2013	Ontiveros and Campanella	Argentina
7 Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system	2013	Lopsik	Estônia
8 Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach	2013	Kalbar et al.	Índia
9 A Decision Support Methodology for Integrated Urban Water Management in Remote Settlements	2012	Tjandraatmadja et al.	Austrália
10 Environmental improvement of alexandria's wastewatertreatment plants using life cycle assessment approach	2012	Roushdi et al.	Egito
11 A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants	2012	Rodríguez-Garcia et al.	Espanha
12 Environmental optimization of continuous flow ozonation for urban wastewater reclamation	2012	Rodríguez et al.	Espanha
13 Environmental assessment of sewage effluent disinfection system: electron beam, ultraviolet, and ozone using life cycle assessment	2012	Lee et al.	Coréia do Sul
14 Life Cycle Environmental and Cost Impacts of Using an Algal Turf Scrubber to Treat Dairy Wastewater	2012	Higgins and Kendall	EUA
15 Net environmental benefit: introducing a new LCA approach on wastewater treatment systems	2012	Godin et al.	Canadá
16 Environmental and profile of six typologies of wastewater treatment plants	2011	Rodríguez-Garcia et al.	Espanha
17 Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions	2011	Fuchs et al.	USA
18 Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project – Case study of Xi'an, China	2010	Zhang et al.	China
19 Life Cycle Assessment of a Wastewater Treatment Plant Focused on Material and Energy Flows	2010	Wu et al.	China

20	Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment. A focus on toxicity-related impacts	2009	Muñoz et al	Espanha
21	Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment	2009	Benetto et al.	Luxemburgo
22	Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town	2007	Ortiz et al.	Espanha
23	A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain)	2007	Hospido et al.	Espanha
24	Life Cycle Assessment of Water Recycling Technology	2005	Tangsubkul et al.	Austrália

Nos últimos 5 anos a produção científica desta temática aumentou consideravelmente em relação aos 5 anos anteriores, atingindo 70% do total selecionado, demonstrando cada vez mais o interesse de analisar o desempenho ambiental como também utilizar os resultados da ACV como fatores na tomada da escolha da melhor tecnologia para tratamento de efluentes. Só em 2012 quase um terço do total de artigos selecionados foram publicados (Figura 1) e o país que mais se destacou na produção de artigos científicos foi a Espanha (Figura 2).

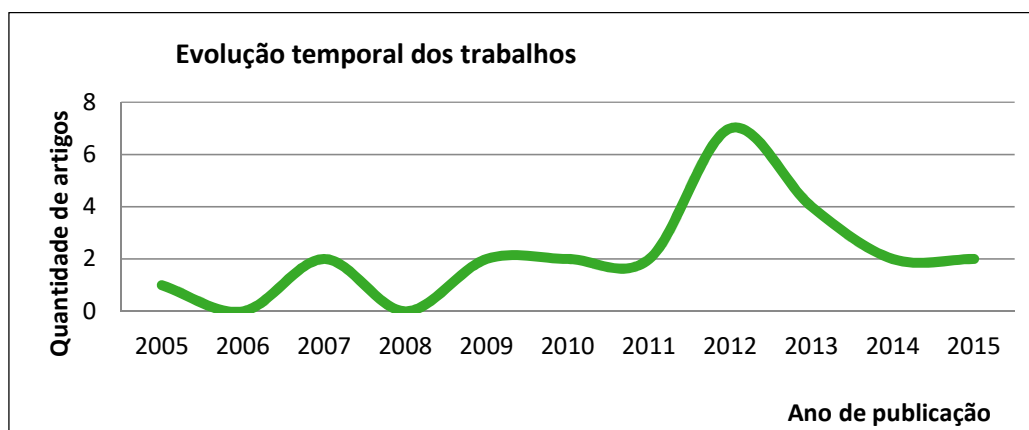


Figura 1: Evolução do número de artigos por ano.

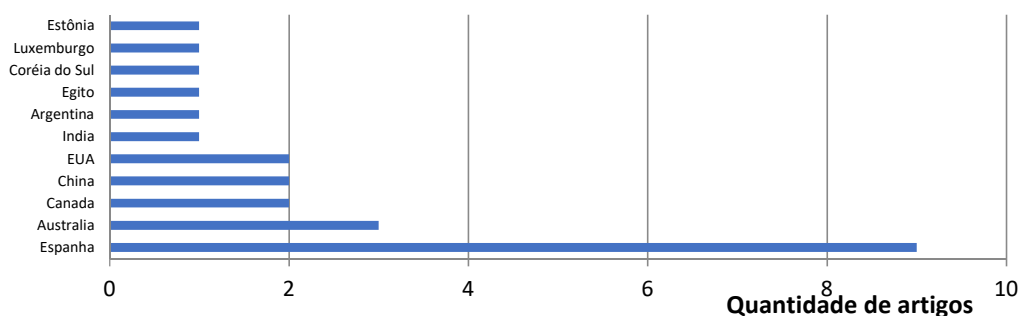


Figura 2: Produção científica por país.

É da Espanha também os autores de maior destaque dentre todos A. Hospido, M. T. Moreira e G. Feijoo oriundos do Departamento de Engenharia Química do Instituto de Tecnologia da Universidade de Santiago de Compostela com 21% dos artigos deste fragmento literário.

Water Research é o periódico mais utilizado para publicação de artigos deste portfólio. Com fator de impacto maior que os demais artigos com 5,528, Water Research publica trabalhos de pesquisa em todos os aspectos da ciência e da tecnologia da qualidade da água e a sua gestão em todo o mundo (Figura 3).

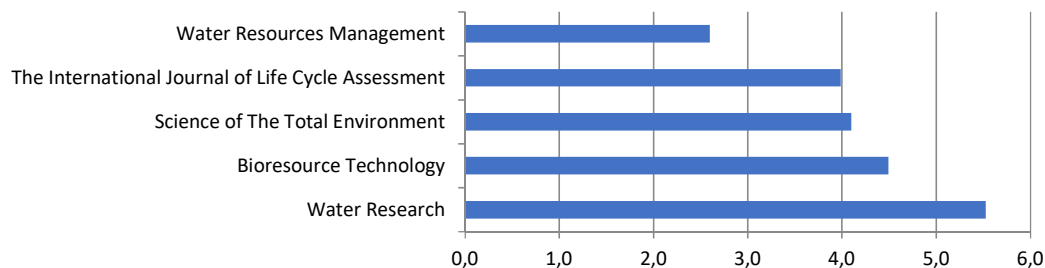


Figura 3: Fator de impacto do periódico e número de artigos publicados em cada.

Diversas tecnologias de tratamento de efluentes foram citadas nos artigos as quais foram submetidas à análise da metodologia de ACV. Neste conjunto, múltiplos cenários foram criados e simulados como também incrementados a fim de identificar qual técnica apresentava melhor desempenho ambiental associado a melhor eficiência do tratamento (FUCHS et al., 2011; LORENZO-TOJA et al., 2015; RODRIGUEZ et al., 2012, BISINELLA DE FARIA et al., 2015) o qual tornou uma ferramenta de apoio a decisão para a escolha do melhor tratamento (TANGSUBKUL et al., 2005) ou melhor fluxo de processos mais adequados para cenários específicos (GARRIDO-BASERBA et al., 2014).

Além disso, pequenas variações das técnicas (KALBAR et al., 2013), sejam elas no tratamento em si, como no descarte de lodos ou reaproveitamento do biogás como fonte energética (CAO et al., 2013) foram simuladas a fim de que os resultados pudessem ser utilizados como ferramenta decisória para a gestão ambiental.

A partir de 2010 alguns autores passam a utilizar uma ou mais ferramentas/métodos em conjunto com a ACV na tomada de decisão como a questão econômica (RODRIGUEZ-GARCIA et al., 2011, TJANDRAATMADJA et al., 2012; THIBODEAU et al., 2014), método DEA (LORENZO-TOJA et al., 2015), método DSS Novedar (GARRIDO-BASERBA et al., 2014), método NEB (GODIN et al., 2012) ou métodos híbridos em que se realiza simulações permitindo uma modelagem dinâmica do sistema de tratamento de efluentes com softwares específicos como BioWin (BISINELLA DE FARIA et al., 2015; RODRIGUEZ-GARCIA et al., 2012) e GPS-X/Mantis (ONTIVEROS et al., 2013).

Os sistemas de tratamento de efluentes presentes neste fragmento literário são bem variados por causa da origem do efluente (residencial urbano ou de pequenas indústrias), o volume (pelo número de habitantes), a possibilidade ou não do aproveitamento dos subprodutos após tratamento complementar como também na combinação de várias técnicas. Deste modo, no Quadro 3 são apresentadas as metodologias de tratamento avaliadas pelos estudos destacados por autor.

Quadro 3: Metodologias de tratamento destacados por autor.

METODOLOGIA DE TRATAMENTO	AUTOR
Tratamento convencional com separação ou não da fonte de urina	Bisinella de Faria et al., 2015
Tratamento secundário variado: tanque de oxidação, lamas ativadas, arejamento prolongado	Garrido-Baserba et al., 2014
Tratamento convencional com separação da fonte de águas negras, cinzas e cozinha	Thibodeau et al., 2014
Compara os sistemas de lamas ativadas, reator batelada, UASB seguido de lagoa aeróbica facultativo e Wetlands	Kalbar et al., 2013
Wetlands e sistema de tratamento de lodo ativado com arejamento prolongado	Lopsik, 2013
Tratamento convencional com sistema Bardenpho	Ontiveros; Campanella, 2013
Sistema submerso anaeróbio MBR (SAnMBR) em diferentes temperaturas	Pretel et al., 2013
Lagoas facultativas em série equipados com aeradores estáticos	Godin et al., 2012
Tratamento convencional + digestor anaeróbico + sistema ATS (algas)	Higgins; Kendall, 2012

Tratamento convencional associado com processo de desinfecção: feixe de elétrons (E-beam), ultravioleta (UV) e sistemas de ozônio	Lee et al., 2012
Lodo ativado seguido de clareamento + Processo de ozonização	Rodríguez et al., 2012
lamas ativadas / digestor anaeróbico (AS/AD) e sistema de lamas ativadas com desnitrificação	Rodríguez-Garcia et al., 2011
Wetlands	Roushdi et al., 2012; Fuchs et al., 2011
Compara os Living Machine®, reator batelada; Sistema MBR; sistemas de aeração estendido; RTF filtro de recirculação têxtil; RBC rotativa filtro biológico; sistema de lamas ativadas	Tjandraatmadja et al., 2012
processo anaeróbico com posterior tanque de sedimentação	Wu et al., 2010
lamas ativadas usando tanque de oxidação, processo de filtração convencional, coagulação química e areia	Zhang et al., 2010
Sistemas de saneamento ecológico (ECOSAN)	Benetto et al., 2009
ozonização em combinação ou não com peróxido de hidrogênio.	Munoz et al, 2009
Tratamento convencional seguido ou não de digestão anaeróbica, com secamento ou não de lamas com presença ou não de tratamento de odores	Hospido et al., 2007
Sistemas de lodos ativados com MBR submerso ou não	Ortiz et al., 2007
Microfiltração Contínua (CMF) com ozonização como uma etapa de pré-tratamento de desinfecção, uma Membrana Bioreactor (MBR) seguido por osmose reversa (RO) como um e metais orgânicos etapa de remoção, e uma lagoa de estabilização do sistema de águas residuais (WSP)	Tangsubkul et al., 2005

Partindo para análise da metodologia de ACV empregada na avaliação dos sistemas de tratamento de efluentes, foram levantados os softwares utilizados pelos autores para analisar os dados coletadas na etapa de inventário. Há vários tipos deles no mercado, porém a maioria dos autores (46%) preferiram o software SimaPro (PRé Consultants – Holanda) logo depois vem os softwares Umberto (Ifu GmbH - Alemanha) e GaBi (ThinkStep – Alemanha). Nos demais trabalhos, que correspondem a 29% do total, não mencionaram o software utilizado. Os resultados podem ser observados na Figura 4.

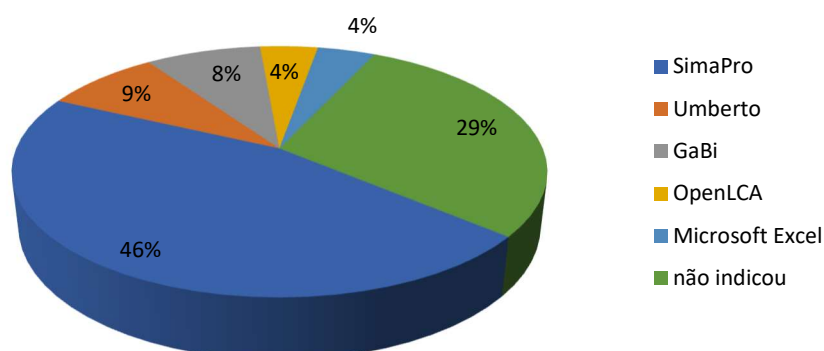


Figura 4: Uso de Softwares para ACV.

Uma das fases mais importantes da ACV é a AICV onde são utilizados métodos de avaliação ou caracterização que consideram os impactos globais e ou relativos a regiões específicas (PEGORARO, 2008). Existe diversos métodos de AICV que são difundidas mundialmente, como por exemplo: Eco-indicador 99 (Holanda), CML (Holanda), EPS 2000 (Suécia), EDIP 2003 (Dinamarca), IMPACT 2002+ (Suíça), BEES (EUA), LIME (Japão), entre outros. Dos trabalhos selecionados o método Eco-indicador 99 foi o mais utilizado pelos autores. Zanghelini e colegas (2012) lembram que esses métodos podem variar os modelos de caracterização, as categorias de impacto disponíveis para avaliação e o alcance dos resultados. Por isso, o que chamou atenção foi que a metade dos trabalhos utilizaram mais de um método de avaliação de impacto do ciclo de vida justificado pelos autores que era para atender os objetivos da proposta de trabalho (THIBODEAU et al., 2014; LOPSIK, 2013; ONTIVEROS et al., 2013; PRETEL et al., 2013; GODIN et al., 2012;

HIGGINS et al., 2012; RODRÍGUEZ et al., 2012; ROUSHDI et al., 2012; TJANDRAATMADJA et al., 2012; FUCHS et al., 2011; BENETTO et al., 2009; MUÑOZ et al., 2009; ORTIZ et al., 2007). E, 25% dos autores não indicaram o método de AICV utilizado. O que nestes dois casos levam a questionar os resultados dos mesmos. A Figura 5 contém os métodos de avaliação contemplados neste portfolio bibliográfico.

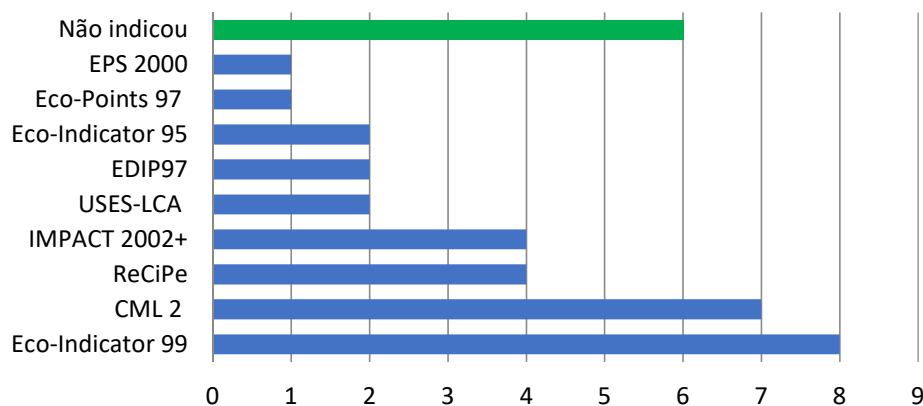


Figura 5: Métodos de AICV utilizados pelos autores.

A definição de unidade funcional é a base de uma ACV, pois representa a escala de comparação de dois ou mais produtos ou ainda a melhoria de um dado produto (USEPA, 2006). Para os sistemas de tratamento de efluentes 46% dos trabalhos utilizam o metro cúbico (m³) de efluente tratado ou a ser tratado e 30% escolheu pessoa equivalente com variações de tempo ou não. Enquanto 16% não apresentou a unidade funcional utilizada no trabalho. A Figura 6 demonstra os tipos de unidades funcionais utilizados.

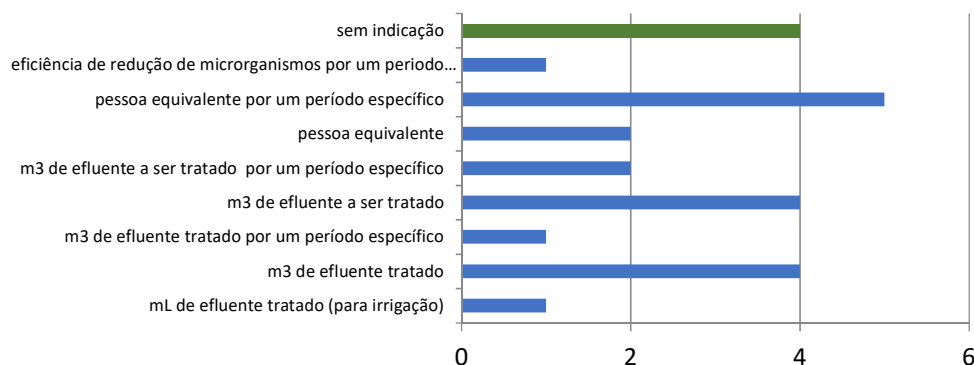


Figura 6: Variações na unidade funcional da ACV.

Em relação às categorias de impactos analisadas nos sistemas de tratamento de efluentes a categoria de mudança climática é a mais representativa (citada em 15 dos 24 artigos), ecotoxicidade (água doce, marinha, terrestre), eutrofização e toxicidade humana. As demais categorias depleção abiótica, depleção da camada de ozônio, oxidação fotoquímica, uso de terras, radiação ionizante, energia não renovável, extração mineral e salinização foram pouco utilizados. Todas estas categorias são em nível *midpoint*. Apenas 5 trabalhos utilizaram categorias *endpoint* (BISINELLA DE FARIA et al., 2015; LORENZO-TOJA et al., 2015; THIBODEAU et al., 2014; LOPSIK, 2013; BENETTO et al., 2009).

A preferência pela categoria de impacto mudança climática é um comportamento recorrente em estudos de ACV, independente do sistema de produto avaliado, pois representa um maior interesse da

comunidade científica e da sociedade, uma vez que os valores em carbono são mais facilmente compreendidos por estes atores devido a ampla divulgação midiática deste tema.

CONCLUSÕES

Diante da revisão integrativa deste portfólio bibliográfico confirmou-se que a ACV é uma ferramenta muito importante na avaliação de sistemas de tratamento de efluentes para determinação dos impactos ambientais. Isto torna-se evidente quando nos últimos cinco anos a produção científica envolvendo esta temática tem aumentado. Além disso, quando a ACV a outras ferramentas de apoio a decisão são utilizadas em conjunto, como análise de decisão multicritério e eco-eficiência, agregar valores de impacto ambiental produzindo uma pontuação única, o que facilitou o processo de tomada de decisão como visto por Thibodeau e colegas (2014).

Nesta vertente, de associar outros métodos para avaliar os sistemas de tratamento de efluentes, alguns autores adicionam o custo da construção e/ou manutenção da estação de tratamento de efluentes (ETE), como também consideram o reaproveitamento do biogás ou do lodo gerado como o tipo de disposição final deste subproduto. No quesito reaproveitamento dos subprodutos, quando contabilizados na avaliação dos impactos ambientais, trouxe aos sistemas de tratamento de águas residuais, pontos positivos.

Na agregação dos dados e realização dos cálculos envolvidos nos estudos de ACV a maioria dos autores (46%) preferiram o software SimaPro (PRé Consultants – Holanda). Nesta mesma porcentagem o banco de dados secundários mais utilizados foi o ecoinvent® e o método de AICV mais empregado foi o Eco-indicador 99 (Holanda).

Outra informação valiosa é a apresentação da unidade funcional onde cerca de 46% dos autores utilizam metro cúbico (m³) de efluente tratado ou a ser tratado e 30% escolheu pessoa equivalente com variações de tempo ou não demonstrando coerência na comparação das técnicas. E, repetindo a mesma porcentagem, 16% dos autores não apresentaram a unidade funcional utilizada na pesquisa o que diminui a confiabilidade dos estudos.

Quanto a produção científica desta temática, a Espanha é o país que mais publicou artigos e o Brasil não apresentou trabalho algum, dentro dos critérios utilizados para a seleção dos artigos. Esta constatação possibilita abrir um novo campo de pesquisa no Brasil avaliando os impactos ambientais das estações de tratamento de efluente sob a ótica da ACV. Os resultados obtidos destes estudos poderão ser essenciais para tomada de decisão no planejamento de ETEs à toda e qualquer cidade, seja ela pequena ou grande, como também, para indústrias e condomínios.

REFERÊNCIAS

BENETTO, E.; NGUYEN, D.; LOHMANN, T.; SCHMITT, B.; SCHOSSELER, P.. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, v.407, p.1506-1516, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.016>

BISINELLA DE FARIA, A. B.; SPÉRANDIO, M.; AHMADI, A.; TIRUTA-BARNA, L.. Evaluation of new alternatives in wastewater treatment plants based on dynamic modelling and life cycle assessment (DM-LCA). *Water Research* v.84, p.99-111, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.048>

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. de A.; MACEDO, M.. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, v.5, n.11, p.121-136, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.21171/ges.v5i11.1220>

BROOME, M. E.. Integrative literature reviews for the development of concepts. In: RODGERS, B. L.; KNAFL, K. A.. **Concept development in nursing**. Philadelphia: Saunders; 1993. p.231-50.

CAO, Y.; PAWŁOWSKI, A.. Life cycle assessment of two emerging sewage sludge-to-energy systems: evaluating energy and greenhouse gas emissions implications. **Bioresource Technology**, v.127, p.81-91, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.135>

FUCHS, V. J.; MIHELICIC, J. R.; GIERKE, J. S.. Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. **Water Research**, v.45, p.2073-2081, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.021>

GARRIDO-BASERBA, M.; HOSPIDO, A.; REIF, R.; MOLINOS-SENANTE, M.; COMAS, J.; POCH, M.. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. **Environmental Modelling and Software**, v.56, n.74-82, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.11.008>

GODIN, D.; BOUCHARD, C.; VANROLLEGHEM, P. A.. Net environmental benefit: introducing a new LCA approach on wastewater treatment systems. **Water Science and Technology**, v.65, p.1624-1631, 2012. DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2012.056>

GUTIERREZ, K. G.. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HIGGINS, B. T.; KENDALL, A.. Life Cycle environmental and cost impacts of using an algal turf scrubber to treat dairy wastewater. **Journal of Industrial Ecology**, v.16, p.436-447, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00427.x>

HOSPIDO, A.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G.. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.13, n.1, p.57-64, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1065/lca2007.03.314>

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A.. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KALAKUL, S.; MALAKUL, P.; SIEMANOND, K.; GANI, R.. Integration of life cycle assessment software with tools for economic and sustainability analyses and process simulation for sustainable process design. **Journal of Cleaner Production**, v.71, p.98-109, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.022>

KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R.. Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach.

Water and Environment Journal, v.27, n.2, p.261-268, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1111/wej.12006>

LEE, K.-M.; YU, S.; CHOI, Y.-H.; LEE, M.. Environmental assessment of sewage effluent disinfection system: electron beam, ultraviolet, and ozone using life cycle assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.17, n.5, p.565-579, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11367-012-0388-9>

LOPES, T. A. S.. **Avaliação do ciclo de vida de uma ETE composta por reator UASB seguido de Wetlands construídos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

LOPSIK, K.. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.10, n.6, p.1295-1308, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1007/s13762-012-0159-y>

LORENZO-TOJA, Y.; VÁZQUEZ-ROWE, I.; CHENEL, S.; MARÍN-NAVARRO, D.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G.. Eco-efficiency analysis of Spanish WWTPs using the LCA+DEA method. **Water Research**, v.68, p.637-650, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.040>

MENDES, K. D. S.; SILVEIRA, R. C. C. P.; GALVÃO, C. M.. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. **Texto Contexto Enfermagem**, v.17, n.4, p.758-764, 2008.

MUÑOZ, I.; RODRÍGUEZ, A.; ROSAL, R.; FERNÁNDEZ-ALBA, A. R.. Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment: a focus on toxicity-related impacts. **Science of the Total Environment**, v.407, n.4, p.1245-1256, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.029>

ONTIVEROS, G. A.; CAMPANELLA, E. A.. Environmental performance of biological nutrient removal processes from a life cycle perspective. **Bioresource technology**, v.150, p.506-512, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.059>

ORTIZ, M.; RALUY, R. G.; SERRA, L.. Life cycle assessment of water treatment technologies: wastewater and water-reuse in a small town. **Desalination**, v.204, n.1-5, p.121-131, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.026>

PEGORARO, L. A.. **Desenvolvimento de fatores de caracterização para toxicidade humana em avaliação do impacto do ciclo de vida no Brasil**. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

PRETEL, R.; ROBLES, A.; RUANO, M. V.; SECO, A.; FERRER, J.. Environmental impact of submerged anaerobic MBR (SAnMBR) technology used to treat urban wastewater at different temperatures. **Bioresource technology**, v.149, p.532-540, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.060>

RESENDE, J. D.; RODRIGUES, P. F. M. A.; PACCA, S. A.; NOLASCO, M. A.. Avaliação do ciclo de vida de sistemas de tratamento de esgoto por lodos ativados convencional e reator UASB seguido de lodos ativados. In: ACADEMIC

INTERNATIONAL ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 5. Anais. São Paulo, 2015.

RODRÍGUEZ, A.; MUÑOZ, I.; PERDIGÓN-MELÓN, J. A.; CARBAJO, J. B.; MARTÍNEZ, M. J.; FERNÁNDEZ-ALBA, A. R.; GARCÍA-CALVO, E.; ROSAL, R.. Environmental optimization of continuous flow ozonation for urban wastewater reclamation. *Science of the Total Environment*, v.437, p.68-75, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.084>

RODRIGUEZ-GARCIA, G.; HOSPIDO, A.; BAGLEY, D. M.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G.. A methodology to estimate greenhouse gases emissions in life cycle inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review*, v.37, p.37-46, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.010>

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*, v.45, n.18, p.5997-6010, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.053>

ROUSHDI, M.; EL-HAWARY, A.; MAHGOUB, M.. Environmental improvement of Alexandria's wastewater treatment plants using life cycle assessment approach. *Global NEST Journal*, v.14, n.4, p.450-459, 2012.

TANGSUBKUL, N.; BEAVIS, P.; MOORE, S. J.; LUNDIE, S.; WAITE, T. D. Life cycle assessment of water recycling technology. *Water resources management*, v.19, n.5, p.521-537, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11269-005-5602-0>

THIBODEAU, C.; MONETTE, F.; GLAUS, M.. Comparison of development scenarios of a black water source-separation sanitation system using life cycle assessment and environmental life cycle costing. *Resources, Conservation and Recycling*, v.92, p.38-54, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.08.004>

TJANDRAATMADJA, G. SHARMA, A.; GRANT, T.; PAMMINGER, F.. A decision support methodology for integrated urban water management in remote settlements.

Water Resources Management, v.27, n.2, p.433-449, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11269-012-0195-x>

TOURINHO, T. C. O.. **Avaliação comparativa do ciclo de vida de processos de tratamento de efluentes domésticos.** Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

USAPEIN, P.; CHAVALPARIT, O.. Life cycle assessment of bi-sludge for disposal with different alternative waste management scenarios: a case study of an olefin factory in Thailand. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v.19, n.1, p.1-15, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10163-015-0385-8>

US Environmental Protection Agency (USEPA). **Life cycle assessment: principles and practice.** National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, 2006.

WU, J.-G.; MENG, X.-Y.; LIU, X.-M.; LIU, X.-W.; ZHENG, Z.-X.; XU, D.-Q.; SHENG, G.-P.; YU, H.-Q.. Life cycle assessment of a wastewater treatment plant focused on material and energy flows. *Environmental Management*, v.46, n.4, p.610-617, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00267-010-9497-z>

YU, J.-P.; ZHENG, Z.-G.. Life cycle assessment system for the whole process of municipal wastewater treatment plants. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, v.31, p.148-151, 2009.

ZHANG, Q.H.; WANG, X.C.; XIONG, J.Q.; CHEN, R.; CAO, B.. Application of life cycle assessment for an evaluation of wastewater treatment and reuse project: case study of Xi'an, China. *Bioresource Technology*, v.101, n.5, p.1421-1425, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.071>

ZANGHELINI, G. M. CHERUBINI, E.; GALINDRO, B. M.; SOARES, S. R.. Percepções do uso de diferentes métodos de AICV: uma comparação baseada no aquecimento global. In.: Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços, 3. Anais. Maringá, 2012.