



Análise do Ciclo de Vida na Gestão de Resíduo Sólidos Urbanos: Uma Revisão Bibliográfica

Mônica Daniele Neves dos Santos¹; Rosane Cristina de Andrade²; Nathalia Salles Vernir²; Alena Torres Netto²

✉ alenanetto@eng.uerj.br

1. *Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).*
2. *Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da UERJ. Maracanã - Rio de Janeiro - RJ.*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 26 de janeiro de 2022

Aceito em: 29 de junho de 2022

Publicado em: 31 de agosto de 2022

Resumo: Com o crescimento acelerado da população brasileira nos centros urbanos, o gerenciamento de resíduos vem sendo um dos principais desafios devido ao volume diário produzido e a complexidade de encontrar soluções para tratamento e destinação desses. Os potenciais impactos associados aos resíduos sólidos urbanos motivam o desenvolvimento de pesquisas científicas sobre o assunto e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se como uma técnica de apoio à tomada de decisão sobre um modelo de gerenciamento de resíduos. No entanto, a confiabilidade dos resultados é influenciada pela metodologia, categorias de impacto selecionados, limites do sistema, qualidade dos dados e robustez das análises. Sendo assim, não é fácil definir uma melhor tecnologia ou política para o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos (GRSU) devido aos diferentes contextos tecnológicos, econômicos, sociais e geográficos dos estudos. Nessa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo fazer um levantamento bibliográfico para analisar a aplicação do método de ACV no GRSU em diferentes países. Após esta análise, foi possível constatar que apesar da grande quantidade de modelos de ACV e sua aplicação resultar na redução de impactos ambientais, ainda não é possível um acordo geral sobre uma estratégia de tratamento de resíduos ideal, pois os modelos de gestão de resíduos dependem do cenário local e devem estar adequados às suas especificidades e características. Sendo assim, a tecnologia e os conceitos utilizados por um determinado país não são transferíveis para outro sem as devidas adaptações.

Palavras-chave: Gestão de resíduos, Gestão ambiental, Impacto ambiental, Resíduos sólidos urbanos.

Life Cycle Assessment in Urban Waste Management: A Literature Review

Abstract: With the accelerated growth of the Brazilian population in urban centers, waste management has been one of the main challenges due to the daily volume produced and the complexity of finding solutions for their treatment and disposal. The potential impacts of urban solid waste motivate scientific research on the subject. The Life Cycle Assessment (LCA) stands out as a technique to support decision making on a waste management model. However, the reliability of the results is influenced by the methodology, impact categories, system limits, data quality, and robustness of analyses. Therefore, it is not easy to define the best technology or policy for the urban solid waste management (USWM) due to the different technological, economic, social, and geographical contexts analyzed. In this perspective, the present study aimed to carry out a bibliographic survey to analyze the application of the LCA method in the USWM in different countries. After this analysis, it was possible to verify that despite the large number of LCA models and their application reducing environmental impacts, a general agreement on an ideal waste treatment strategy is not possible since waste management models depend on the local scenario and should be adapted to its specificities and characteristics. Thus, the technology and concepts used by a particular country cannot be transferred to another without appropriate adaptations.

Keywords: Waste management, Environmental management, Environmental impact, Urban solid waste.

Análisis del Ciclo de Vida en la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos: Una Revisión de la Literatura

Resumen: Con el crecimiento acelerado de la población brasileña en los centros urbanos, la gestión de residuos ha sido uno de los principales desafíos debido al volumen diario producido y la complejidad de encontrar soluciones para su tratamiento y eliminación. Los posibles impactos asociados a los residuos sólidos urbanos motivan el desarrollo de investigaciones científicas sobre el tema y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se presenta como una técnica de apoyo a la toma de decisiones sobre un modelo de gestión de residuos. Sin embargo, la confiabilidad de los resultados es profundamente influenciada por la metodología, las categorías de impacto seleccionadas, los límites del sistema, la cualidad de los datos y robustez de los análisis. De esta manera, no es fácil concluir y generalizar la mejor tecnología o política para el gestión de los residuos sólidos urbanos (GRSU) debido a los diferentes contextos tecnológicos, económicos, sociales y geográficos de los estudios. En esa perspectiva, el presente estudio tuvo como objetivo hacer un levantamiento bibliográfico para analizar la aplicación del método ACV en el GRSU de diferentes países. Después de este análisis fue posible constatar que además de la gran cantidad de modelos de ACV y su aplicación resultar en la reducción de impactos ambientales, aún no es posible llegar a un acuerdo general sobre la estrategia de tratamiento de residuos ideal, porque los modelos de gestión son desarrollados para cada escenario local y deben estar adecuados a sus especificidades y características. De esta manera, la tecnología y los conceptos utilizados por un país en particular no pueden transferirse a otro sin las debidas adaptaciones.

Palabras clave: Gestión de residuos, Gestión ambiental, Impacto ambiental, Residuos sólidos urbanos.

INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo e acentuado da população mundial tem tornado o gerenciamento de resíduos um dos principais desafios atuais, considerando a complexidade de encontrar soluções para tratamento/destinação dos resíduos que são produzidos em grandes quantidades (SANTOS, 2011). De acordo com estimativa do Banco Mundial (KASA, 2018), a taxa de geração anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) alcançou o marco de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas, onde um terço não é tratado em condições adequadas e que, seguindo essa tendência, tal montante irá aumentar 70% até 2050, chegando aos 3,4 bilhões de toneladas por ano (KAZA *et al.*, 2018).

No Brasil, com o crescimento acelerado e concentrado da população nas cidades, problemas de serviços urbanos como habitação e saneamento são causados pela falta de planejamento e gestão inadequada dos órgãos públicos, e cada vez mais esses problemas são acumulados, causando um enorme déficit desses serviços para a população. Cabe às autoridades públicas municipais a tarefa de coleta e destinação final ambientalmente adequada dos RSU gerados, porém estas atividades demandam recursos financeiros que nem sempre são custeados pela população (LIMA *et al.*, 2019).

De acordo com Mahler (2007), o Brasil avança numa posição contrária ao que acontece nos países desenvolvidos, pois nesses países ocorre uma tendência de diminuição dos custos

relacionados a gestão dos RSU por meio da implementação de tecnologias mais baratas e apropriadas ao tratamento, enquanto que as despesas de coleta, tratamento e disposição final adequados têm sido crescentes no Brasil.

Os RSU apresentam composição muito variada e são subprodutos de todas as atividades humanas. A sua composição e taxa de geração são diretamente influenciadas pelo status socioeconômico do país, isto é, países de alta renda são geralmente os maiores produtores de resíduos, sendo a maior porção composto por papel, plástico e outros materiais não-orgânicos, enquanto os países de baixa a média renda, possuem a maior parte dos resíduos composto por frações orgânicas (DAS *et al.*, 2019).

Um estudo realizado por Wilson *et al.* (2001) avaliou onze programas de gestão de resíduos, em nove países Europeus. Nesse estudo, os aspectos econômico, social, político, ambiental, legal e técnico de cada programa específico foram analisados. Uma das principais conclusões é que, em função do grande número de variáveis envolvidas e das diferentes particularidades de cada município, não existe uma única “maneira correta” de manejo para os resíduos ou de criação de um sistema integrado de gerenciamento. Todavia, há metodologias de como chegar ao melhor modo de fazê-lo, por isso, cada municipalidade deverá estudar e buscar o desenvolvimento de seu próprio modelo ou sistema, baseado nas características e peculiaridades locais.

A busca por conhecimentos sobre quais os potenciais impactos associados ao tratamento dos resíduos motivam o desenvolvimento de pesquisas científicas sobre o assunto. Devido a um controle mais rigoroso do cumprimento da legislação e ao aumento da conscientização ambiental, torna-se primordial que sejam buscadas novas tecnologias que auxiliem no correto tratamento e destinação final dos resíduos. Neste sentido, destaca-se entre as metodologias mais aplicadas, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que é uma técnica de apoio à tomada de decisão sobre o modelo a ser adotado no gerenciamento de resíduos. Essa ferramenta, por considerar todo o ciclo de vida do sistema de gerenciamento, desde a geração até a disposição final, pode auxiliar aos tomadores de decisões e organizações governamentais no planejamento estratégico e na definição de processos de tratamento para a questão dos RSU (MERSONI e REICHERT, 2017).

A significância da ACV no campo do gerenciamento de resíduos tem sido afirmada pelo crescente número de estudos científicos aplicando essa abordagem ao redor do mundo nos últimos tempos (IQBAL *et al.*, 2020). No entanto, a confiabilidade dos resultados é profundamente influenciada pela metodologia, categorias de impacto selecionados, limites do sistema, qualidade dos dados e robustez das análises. Sendo assim, não é fácil generalizar a

melhor tecnologia ou política para o gerenciamento de RSU devido aos diferentes contextos tecnológicos, econômicos, sociais e geográficos dos estudos. Porém, se um estudo for realizado com uma escala grande o suficiente para cobrir uma boa parte de países de baixa à alta renda, os resultados podem promover uma informação crítica e dar ênfase as melhores práticas em busca da sustentabilidade no gerenciamento dos RSU (GRSU) para os formadores de políticas em geral (IQBAL *et al.*, 2020).

Com a crescente preocupação por soluções para as demandas relativas aos resíduos sólidos urbanos, a implementação de técnicas alternativas e inovadoras se torna cada vez mais necessária, visando a ampliação e o aprofundamento do conhecimento a respeito das diversas frações de resíduos gerados nos centros urbanos.

Nessa perspectiva, o presente estudo teve como objetivo avaliar as aplicações da ferramenta de ACV como um instrumento para a gestão de resíduos sólidos urbanos em diferentes países por meio de uma revisão sistemática.

METODOLOGIA

Esta pesquisa se caracteriza como exploratória, de natureza aplicada, na qual os dados foram levantados através de uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados *Science Direct*, *web of Science* e Periódicos Capes.

Para a realização do levantamento científico optou-se pela utilização do *Methodi Ordinatio*, metodologia de revisão sistemática que orienta a busca, seleção, coleta e classificação de artigos científicos. Essa metodologia utiliza a equação *InOrdinatio*, que permite classificar os artigos quanto à sua relevância científica. A equação trabalha com os três fatores mais importantes em um artigo científico: o fator de impacto, o ano da publicação da pesquisa e o número de citações. Assim, o método auxilia a encontrar os artigos relevantes em cada tema e apresenta a seguinte fórmula:

$$\text{InOrdinatio} = (\text{IF}/1000) + \alpha * [10 - (\text{Research Year} - \text{Publish Year}) + (\sum \text{Ci}) \quad (1)$$

Em que IF é fator de impacto do artigo, α o fator de ponderação que varia de 1 a 10, a ser atribuído pelo pesquisador, “Research Year” o ano em que a pesquisa foi desenvolvida, “Publish Year” o ano em que o artigo foi publicado e $\sum \text{Ci}$ refere-se ao número de vezes que o documento foi citado.

Dentre os artigos pesquisados, foram filtradas as publicações mais recentes, ou seja, entre os anos de 2015 e 2020, que abordavam os temas de ACV e gestão de resíduos nos diversos países do mundo.

Todos os artigos citados foram utilizados no presente trabalho, tanto para leitura e construção do referencial teórico, como para a análise dos métodos de Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV) utilizado por cada autor em seu trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das ferramentas de gerenciamento utilizadas pela gestão ambiental que permite avaliar, melhorar e diminuir os impactos ambientais associados a um produto ou atividade ao longo de todo o seu ciclo de vida (“do berço ao túmulo”). Essa metodologia permite compilar os fluxos de entrada (matérias-primas, recursos e energia) e saída (emissões atmosféricas, emissões líquidas e resíduos sólidos) a cada etapa do ciclo de vida e avaliar os potenciais impactos ambientais associados a um produto ou processo. As normas da família ISO 14040 de 2009 representam a estrutura metodológica de realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (figura 1) (ABNT, 2009).

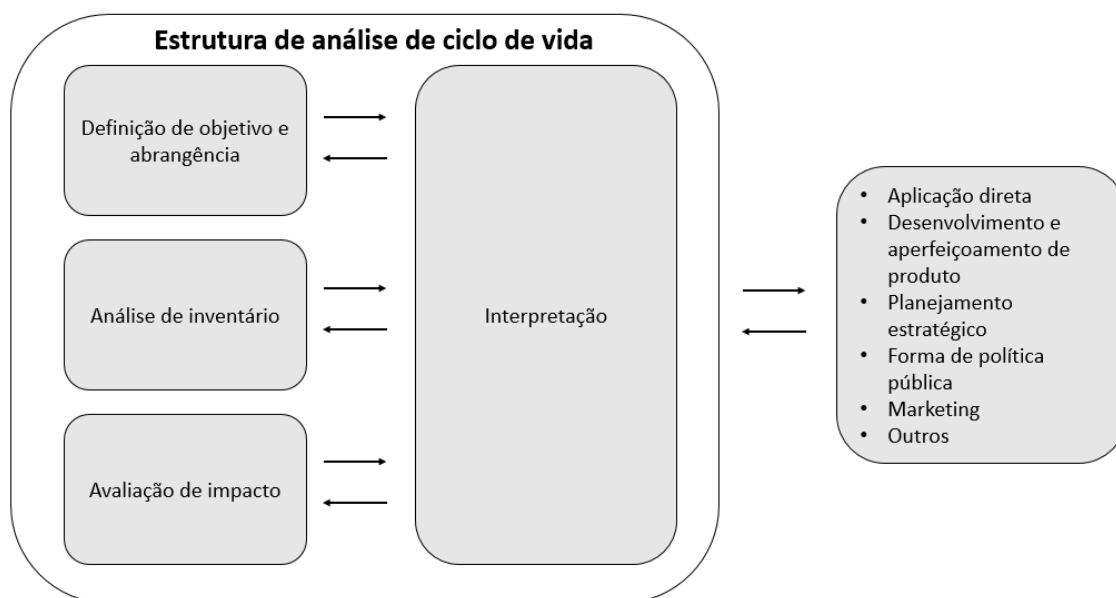


Figura 1 – Etapas da Avaliação do Ciclo de Vida

Fonte: (ABNT, 2009). Adaptado.

Para uma ACV ser bem-sucedida é necessário definir o escopo do estudo, a unidade funcional, os limites do sistema, a escolha dos dados de entrada e a seleção das categorias de

impacto (IQBAL, 2020). Segundo Bigum *et al.* (2014), as principais categorias de impactos utilizados em ACV são: aquecimento global, depleção de ozônio, toxicidade humana, potencial de oxidantes fotoquímicos, acidificação, potencial de eutrofização, ecotoxicidade e depleção dos recursos abióticos ou recursos fósseis.

Wang *et al.* (2020) elaboraram um estudo para avaliar o histórico do potencial de aquecimento global relacionado ao GRSU da cidade de Nottingham, na Inglaterra, no período compreendido entre abril de 2001 a março de 2017, por meio do método de ACV. Os resultados mostraram uma redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 1.076 kg CO₂-eq./ton em 2001/2002 para 211,3 kg CO₂-eq./ton em 2016/2017 no GRSU devido aos avanços implementados na coleta, tratamento, reciclagem e não geração de resíduos. O estudo também mostrou que uma redução de 142,3 kg CO₂-eq./ton pode ser alcançada caso seja feita a separação dos resíduos orgânicos e adotado o tratamento desses resíduos orgânicos por meio de digestão anaeróbia e pré-tratamento por incineração em uma instalação de recuperação.

Khandelwal *et al.* (2019) estudaram a geração de resíduos na cidade de Nagpur, na Índia, onde existe, uma crescente preocupação a respeito do GRSU da região. O lixo da região, onde são destinados os RSU, é sujeito a frequentes queimadas durante o verão, causando poluição do ar, odor incômodo e impacto adverso na saúde da vizinhança. A utilização da metodologia da ACV foi motivada pela necessidade de quantificar os impactos do sistema de GRSU, comparando quatro alternativas. O cenário composto de uma instalação de reciclagem de materiais, digestão anaeróbica e aterro sanitário apresentou menores impactos ambientais nas categorias de potencial de aquecimento global, toxicidade humana, eutrofização e potencial fotoquímico de criação de ozônio. Também foi feita uma análise de sensibilidade, no qual verificou-se que existe uma relação inversamente proporcional entre as mudanças na taxa de reciclagem e as cargas ambientais.

Outro estudo na Índia analisou os impactos do sistema de GRSU de três cidades: Chandigarh, Mohali e Panchkula usando a metodologia da ACV. Cinco cenários de métodos de tratamento, processamento e disposição final de resíduos foram analisados e comparados com os respectivos impactos ambientais como potencial de aquecimento global, toxicidade humana, eutrofização e acidificação. A pesquisa concluiu que o cenário presente até aquele momento, composto pela disposição final dos resíduos em um lixão, possuiu os efeitos mais graves e prejudiciais ao meio ambiente, sendo o responsável pela maior emissão de GEE, enquanto o cenário composto pela combinação de reciclagem, compostagem, e aterro sanitário com recuperação de energia possui o menor impacto ambiental (HANA *et al.*, 2019).

Com base na pesquisa desenvolvida por Rajcoomar e Ramjeawon (2017), quatro cenários na Ilha de Maurícia, localizada a cerca de 2 mil km do continente africano, foram comparados e avaliados. A pesquisa mostrou que além do cenário utilizado à época, composto por aterramento sanitário dos resíduos com recuperação de energia, representar o pior cenário em todas as categorias de impacto, com exceção para o potencial de depleção do ozônio e toxicidade humana, todos os outros cenários alternativos possibilitaram significativas reduções em termos de emissões terrestres e aquáticas. O cenário composto por incineração com recuperação de energia apresentou o menor impacto ambiental em todas as categorias, com exceção da categoria de aquecimento global e toxicidade humana, sendo esse cenário recomendado como a melhor escolha para tratamento dos RSU na ilha. O estudo concluiu que a hierarquia da gestão de resíduos deve ser aplicada com flexibilidade e levando em consideração as especificidades locais.

Em Kolhapur, na Índia, Mali e Patil (2016) analisaram quatro cenários, incluindo o cenário utilizado até aquele momento que consiste na disposição dos resíduos em um lixão localizado na cidade. Os outros cenários incluem a reciclagem e três diferentes opções de tratamento: compostagem, digestão anaeróbia e pirólise-gaseificação para matéria orgânica. A fim de investigar o cenário mais viável baseado nas análises de impacto ambiental, utilizou-se a ferramenta de ACV pelo software SimaPro 7. O estudo concluiu que o cenário utilizado na prática na região possui os maiores impactos ambientais, conforme esperado, principalmente em termos de emissão de GEE, e o cenário composto por compostagem consiste na opção mais favorável em relação às opções de tratamentos biológicos com recuperação de energia.

Chi *et al.* (2015) em estudo realizado na China, aplicaram a ACV pela primeira vez na cidade de Hangzhou, capital da cidade de Zhejiang Province, umas das áreas mais desenvolvidas do País, para obter uma avaliação da coleta seletiva e das estratégias de GRSU. Foram comparados quatro cenários diferentes, sendo que o primeiro analisou a coleta do sistema em que parte dos RSU eram aterrados sem separação prévia, e o restante tinha como tratamento a incineração. O segundo cenário analisou a condição adotada em Hangzhou em 2015, com a coleta seletiva, e o terceiro e quarto cenários foram modelados a partir dos planos futuros de gestão, no qual um novo incinerador seria construído a curto prazo (cenário 3), e técnicas de tratamento biológico para os resíduos orgânicos seriam introduzidas de acordo com os planos a longo prazo da cidade (cenário 4). No estudo foi possível concluir que, ao se comparar com a coleta comum, a coleta seletiva reduziu em 30, 18, 28 e 30% os impactos sobre o aquecimento global, acidificação, eutrofização e potencial de formação de ozônio fotoquímico, respectivamente. O

desvio de resíduos do aterro para a incineração apresentou melhor performance ambiental em todos as categorias de impacto investigadas.

A pesquisa realizada por Ogundipe e Jimoh (2015), analisou três cenários para a cidade de Minna, na Nigéria. O cenário utilizado na cidade no momento da análise era composto por um lixão a céu aberto, onde os materiais recicláveis (somente metais) são coletados por catadores em condições insalubres. Os resíduos orgânicos (46,85%) representavam o maior percentual de geração na cidade. O estudo concluiu que o cenário composto por 17,05% de reciclagem, 50,04% de compostagem e 32,91% como destinação final o aterro sanitário apresentou as melhores e mais favoráveis alternativas em termos de ecotoxicidade, eutrofização, acidificação, potencial carcinogênico e aquecimento global.

O GRSU em uma cidade localizada ao leste da Sibéria, na Rússia, chamada Irkutsk, gera aproximadamente 500.000 toneladas de resíduos, e apenas 3% são reciclados. O restante é disposto em um lixão desprovido de qualquer controle de coleta de lixiviados e de gases e que irá esgotar sua capacidade de recebimento nos próximos anos. A ACV mostrou que esse cenário é o mais significativo em termos de impactos ambientais, principalmente em emissão de metano (STAROSTINA *et al.*, 2017).

Em relação à cidade do Rio de Janeiro, Brasil, os resultados da análise de GRSU local indicaram que a situação atual apresenta a pior performance em termos ambientais, o que indica a urgência na implementação de estratégias em busca de um sistema de gestão mais sustentável. O estudo também mostrou que para o Brasil, os cenários com ênfase na reciclagem dos materiais trazem mais benefícios que as alternativas focadas em geração de energia, como por exemplo, aterro sanitário com recuperação do biogás, e incineração com geração de energia (COELHO; LANGE, 2018).

Destaca-se também o caso da República da Sérvia, país candidato à entrada na União Europeia (UE), sendo obrigado a seguir as diretivas impostas pela UE. Diferentes objetivos precisam ser cumpridos, e um deles é a gestão dos resíduos, que deve ser melhorada a fim de atender a todos os requisitos regulatórios da UE. Dessa forma, em 2018, o método da ACV foi aplicado em uma determinada região da República da Sérvia, no Sul de Backa, em quatro diferentes cenários. Apesar do estudo não obter uma resposta definitiva sobre qual é o melhor método de tratamento, pois para isso é necessária uma comparação entre custos e benefícios, foi possível concluir que o cenário utilizado a época, composto pela disposição dos resíduos em um lixão, representava os maiores custos ambientais e, portanto, não deveria ser aceito. O cenário composto pela incineração de 100% dos resíduos gerados apresentou os melhores

resultados de acordo com os indicadores ambientais, porém, é necessário considerar os custos de viabilidade econômica com a construção e operação da planta (STEPANOV *et al.*, 2018).

Vale ressaltar que o uso de softwares facilita o processamento dos dados e permite uma compilação de maneira mais simples, imparcial e ágil, garantindo também a confiabilidade final dos cálculos. Sendo assim, permitem o gerenciamento dos dados por meio da disponibilização de bancos de dados, efetuam a avaliação de impacto e interpretação, que podem ser regularmente atualizadas, e disponibilizam a compilação dos resultados por meio de gráficos e tabelas (RODRIGUES *et al.*, 2008).

Na Tabela 1, é possível observar o ano de publicação de cada um desses estudos, qual o software e modelos utilizados para a avaliação, quais as categorias de impacto e os principais resultados encontrados de cada estudo.

Tabela 1 – Panorama dos artigos analisados de ACV aplicados nos RSU em diferentes países.

País e Referência	Unidade Funcional (UF), Modelo e Método	Cenários (C)	Categorias de Impacto	Resultados Críticos
Inglaterra Wang <i>et al.</i> (2020)	UF: 1 T de RSU Modelo: NE Método: IPCC 2013	CI: 54,7% AS, 40,7% Inc, 3,4% Reci, 1,2% Comp C2: 32,7% AS, 17,5% Rec, 8,6% Comp, 41,2% Inc C3: 7,3% AS, 31,5% Reci, 12,9% Comp, 57,6% Inc C4: 7,3% AS, 31,5% Reci, 12,9% DA (c/ recuperação de energia), 57,6% Inc	Potencial de aquecimento global	O cenário futuro indicou que a separação dos resíduos orgânicos na fonte e tratamento por digestão anaeróbia, pré-tratamento dos resíduos após a incineração e substituição da compostagem por leiras aberta pela digestão aeróbia pode reduzir as emissões relacionadas ao sistema de GRSU.
Índia Khandelwal <i>et al.</i> (2019)	UF: 1 T de RSU Modelo: GaBi 8.5.0.79 Método: CML-IA	CI: 17% Comp, 83% LI C2: 7,5% Reci, 48,1% COMP, 44,4% LI C3: 7,5% Reci, 48,1% AD, 44,4% LI C4: 7,5% Reci, 24,05% Comp, 24,05% AD, 44,4% LI	Potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, potencial de depleção abiótica, toxicidade humana, potencial de formação de ozônio fotoquímico	O cenário composto pela combinação de reciclagem, compostagem e aterramento dos resíduos apresentou o menor impacto ambiental nas categorias de aquecimento global, toxicidade humana, eutrofização e potencial de formação de ozônio fotoquímico.
Índia Hana <i>et al.</i> (2019)	UF: 1 T de RSU Modelo: NE Método: Eco-indicator 99	C2: 20% Reci, 80% AS com 50% de coleta do biogás C3: 20% Reci, 40% Comp, 40% AS C4: 20% Reci, 60% Ccomp, 40% DA + AS (rejeito)/biogás coletado para geração de energia C5: 20% Reci, 40% Comp, 40% inc	Potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização e toxicidade humana.	O cenário composto pela combinação da reciclagem, compostagem e aterramento sanitário mostrou o menor impacto ambiental
República da Maurícia Rajcoomar e Ramjeawon (2017)	UF: 427,687 T de RSU Modelo: SimaPro Método: CML-IA e ReCiPe	CI: 100% AS com recuperação de energia C2: 100% incineração com recuperação de energia C3: 60,40% Inc, 30,8% Comp, 8,8% AS C4: 30,8% Comp, 49,30% Inc, 6,9% AS, 13% Reci	Potencial de depleção abiótica, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade em meio terrestre e aquático (águas doces e salinas), oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização.	O cenário 2 mostrou ganhos nas categorias de saúde humana e ecossistemas. O cenário 4 performou melhor na categoria de recursos devido à energia recuperada na incineração e ao uso de materiais recicláveis.

País e Referência	Unidade Funcional (UF), Modelo e Método	Cenários (C)	Categorias de Impacto	Resultados Críticos
Índia Mali e Patil (2016)	UF: 1 T de RSU Modelo: SimaPro 7 Método: CML	CI: 100% LI C2: 16,88% Reci, 65,33% Comp, 17,79% AS C3: 16,88% Reci, 65,33% DA, 17,79% AS C4: 16,88% Reci, 70,33% + 7,23% pirólise-gaseificação, 5,56% AS	Potencial de aquecimento global, ecotoxicidade, toxicidade humana, eutrofização, acidificação, summer smog	O atual lixão apresentou os maiores impactos ambientais, principalmente no potencial de aquecimento global. O tratamento por pirólise-gaseificação é uma opção mais favorável que a digestão anaeróbica devido ao menor impacto em termos de ecotoxicidade, toxicidade humana e summer smog.
China Chi <i>et al.</i> (2015)	UF: 2,502M T de RSU Modelo: NE Método: EDIP 97	CI: 50,77% AS, 49,23% Inc C2: 49,23% Inc, 44,8% AS, 5,97% Reci C3: 63,6% Inc, 30,4% AS, 6% Reci C4: 63,3% Inc, 16% AS, 14,4% TB, 6,3% RECI	Potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, potencial de formação de ozônio fotoquímico.	Comparando-se com a coleta comum, um total de 30, 18, 28 e 30 % de impactos em GWI00, AC, NE e POF foram reduzidos, respectivamente, após a coleta seletiva. Desvio de resíduos do aterro para a incineração mostrou-se eficiente na redução dos impactos ambientais.
Nigéria Ogundipe e Jimoh (2015)	UF: 1 T de RSU Modelo: Simapro 7.2 Método: Impact 2002+	CI: 17,05% Reci, 50,04% Comp, 32,91% AS C2: 17,05% Reci, 82,95% Inc C3: 17,05% Reci, 82,95% AS	Potencial carcinogênico, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização e potencial de aquecimento global.	Dos cinco parâmetros de impactos considerados, o cenário 1 foi a alternativa melhor e mais favorável em termos de redução nas categorias de impacto potencial de aquecimento global, carcinogênico, ecotoxicidade e potencial de acidificação.
Brasil Coelho e Lange (2018)	UF: 3.465.187 T Modelo: LCA-IWM Método: CML 2001	CI: 49.823T AS, 12.806T Reci, 3.406.461T AS C2: 1.905.432T Inc, 1.789.091T AS, 12.806T Reci, 49.823T Comp C3: 1.905.432T TMB, 1.556.877T AS, 49.823T Comp, 12.806T Reci C4: 1.905.432T TMB AE, 1.561.794T AS, 12.806T Reci, 49.823T Comp C5: 10.095.277T Comp, 710.190T Reci, 1.818.309T AS	Depleção Abiótica, acidificação eutrofização, aquecimento global, toxicidade humana, oxidação fotoquímica.	O estudo concluiu que a estratégia mais sustentável de GRSU para o Rio de Janeiro consiste no investimento na coleta seletiva e reciclagem dos materiais ao invés da incineração ou diretamente o aterramento.

País e Referência	Unidade Funcional (UF), Modelo e Método	Cenários (C)	Categorias de Impacto	Resultados Críticos
		C6: 1.095.277T DA, 710.190T Reci, 1.818.309T AS C7: 410.729T Comp, 410.729T DA, 426.114T Reci, 554.404T Inc, 1.859.155T AS C8: 547.639T Comp, 547.639T DA, 710.190T Reci, 1.659.721T Inc, 448.865T AS		
República da Sérvia Stepanov <i>et al.</i> , (2018)	UF:NE Modelo: IWM-2 Método: Impact2002+	C1: 91% LI, 9%Reci C2: 53% AS, 31% Comp, 16% Reci C3: 53% Inc, 31% Comp, 16% Reci C4: 100% Inc	Aquecimento Global, Acidificação Terrestre e Ocupação Terrestre	A pesquisa concluiu que o cenário atual composto pela disposição dos resíduos em lixões é a pior opção em termos de impactos ambientais. A melhor opção consiste na combinação entre compostagem, separação de materiais recicláveis, reciclagem e tratamento térmico dos resíduos.

Legenda: LI: Lixão, DA: Digestão Anaeróbia, AS: Aterro Sanitário, COMP: Compostagem, RECI: Reciclagem, INC: Incineração, TB: Tratamento Biológico, TMB: Tratamento Mecânico Biológico, NE: Não Especificado. GW100: Global Warming, AC: Acidification, NE: Nutrient enrichment e POF: Photochemical ozone formation

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação aos softwares, constata-se que (MERSONI e REICHERT, 2017; OLIVEIRA, 2019):

✓ SimaPro 7.2 é uma ferramenta de coleta de dados e análise do desempenho ambiental de produtos, processos e serviços, de acordo com as recomendações da ISO 14040/2014;

✓ IWM-2 foi elaborado para realizar o inventário do ciclo de vida especificamente para o sistema de GRSU, e permite simular cenários a partir de dados como geração, coleta, tratamento biológico, tratamento térmico, reciclagem e disposição final, indicando os potenciais impactos relacionados ao sistema;

✓ GaBi permite a avaliação de sistemas de produtos e suporta todas as etapas de uma ACV, rastreia automaticamente todos os fluxos de materiais, energia e emissões, além de permitir a aferição do desempenho por meio de diversas categorias de impacto ambiental, assim como a possibilidade de análises econômicas, tempo de trabalho e questões sociais.

A avaliação dos cenários e as suposições realizadas devem ser devidamente justificadas e sua significância testada por uma análise de sensibilidade. Além disso, a avaliação dos impactos econômicos também é fator crucial na seleção de uma tecnologia (IQBAL, 2020), pois, de acordo com Dong *et al.* (2014), as tecnologias que exigem grandes investimentos e mão de obra qualificada são economicamente viáveis apenas em países desenvolvidos. Nos demais países, o mais indicado seria promover a redução de geração dos resíduos e o estímulo das atividades de reciclagem, minimizando o descarte dos resíduos em aterros sanitários.

CONCLUSÕES

De acordo com o trabalho desenvolvido, foi possível observar que apesar da grande quantidade de modelos de ACV e estudos tendo como foco a gestão dos resíduos, ainda não existe um consenso sobre uma estratégia de tratamento de resíduos ideal, pois os modelos de gestão de resíduos têm que levar em consideração cada cenário local e devem estar adequados às suas especificidades e características, sob pena de produzirem resultados muito aquém do esperado. Sendo assim, o modelo utilizado por um determinado país não pode ser adotado em outros sem as devidas adaptações.

Os resultados da avaliação sugerem que para alcançar maior sustentabilidade ambiental, a recomendação de estratégia mais apropriada seria a integração de múltiplas tecnologias de tratamento e a redução do descarte em aterros sanitários.

Nesse contexto, a ferramenta da ACV foi apresentada e analisada sob o ponto de vista do GRSU, sendo possível observar que a ACV vem se tornando uma ferramenta de grande relevância para o desenvolvimento do gerenciamento dos resíduos no mundo, visto a sua grande inserção no ambiente técnico, científico e acadêmico. A utilização de programas computacionais nessa etapa, apesar de necessitar de muitos dados e de informações para a sua alimentação, se mostra viável no apoio à tomada de decisão para a definição de sistemas integrados e sustentáveis de GRSU.

Sendo assim, este estudo pode auxiliar os gestores e tomadores de decisão em planejar estrategicamente possíveis cenários para a problemática do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos com o uso da ferramenta de ACV.

Vale ressaltar que há uma limitação quanto ao uso da AVC, sendo necessário ampliar buscar em outras bases de dados, aumentar a análise temporal, elaborar outros tipos de avaliações e discussões para que as informações levantadas ganhem mais precisão e possam ter aplicação mais efetiva para o gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ por estimular atividades nas áreas científica e tecnológica e apoiar de maneira ampla projetos e programas de instituições acadêmicas e de pesquisa sediadas no Estado do Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR. 10.004:2018 – Sistemas de Gestão Ambiental – Diretrizes Gerais sobre Princípios, Sistemas e Técnicas de Apoio. Rio de Janeiro, RJ: 2018

BIGUM, M. K. K.; CHRISTENSEN, T. H.; SCHEUTZ, C. Life cycle assessment of the management of special waste types: WEEE and batteries. 2014. (PhD Thesis). DTU Environment Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Dinamarca

CHI, Y. DONG, J. TANG, Y. HUANG, Q. NI, M. Life cycle assessment of municipal solid waste source-separated collection and integrated waste management systems in Hangzhou, China. Recent Thermal Treatment Research of Wastes, v. 17, p. 695–706, 2014.

COELHO, L. M. G.; LANGE, L. C. Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. Resources, Conservation and Recycling, v.128, p. 438–450, 2018.

DAS, S. Lee, SH. KUMAR, P. KIM, K. LEE, S. BHATTACHARYA, S. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability Journal of Cleaner Production 228: 658–678. 2019

- DONG, J. CHI, Y. ZOU, D. FU, C. HUANG, Q. NI, M. Energy –environment –economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study. *Appl. Energy*, v. 114, p. 400–408, 2014.
- HANA, R. GANGULY, R. GUPTA, A. Life-cycle assessment of municipal solid-waste management strategies in Tricity region of India. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 21, p. 606–623, 2019.
- IQBAL, A. LIU, X. CHEN, G-H. Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. *Science of The Total Environment*, v 729: 138622, 2020.
- KAZA, S. YAO, L. BHADA-TATA, P. VAN WOERDEN, F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. Washington, DC: World Bank, 2018.
- KHANDELWAL, H. THALLA, A. KUMAR, S. KUMAR, R. Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. *Bioresource Technology*, v.288, 2019.
- LIMA, S. M. S. A., LOPES, W. G. R., & FAÇANHA, A. C. Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre planos e realidade. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 11, e20190037. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011e20180037>, 2019
- MAHLER, C. F.; GUEDES, V. Projeto de compostagem na Prefeitura universitária da UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- MALI, S. T.; PATIL, S. S. Life-cycle assessment of municipal solid waste management. *Waste Management & Research*, 169(4): 181-190. 2016.
- MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. *Engenharia Ambiental e Sanitária*, v. 22, n. 5, p. 863–875, 2017.
- OGUNDIPE, F. O.; JIMOH, O. D. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in Minna, Niger State, Nigeria. *International Journal of Environmental Research*, v. 9, p. 1305–1314, 2015.
- OLIVEIRA, A. L. A. R. Avaliação do Ciclo de Vida Aplicada na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de caso do Distrito Federal. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, 96p. 2019.
- RAJCOOMAR, A.; RAMJEAWON, T. Life cycle assessment of municipal solid waste management scenarios on the small island of Mauritius. *Waste Management & Research*, v. 35(3), p. 313–324, 2017.
- RODRIGUES, C. R. B. ZOLDAN, M. LEITE, M. OLIVEIRA, I. Sistemas computacionais de apoio a ferramenta análise de ciclo de vida do produto (ACV). *Anais do XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – A integração de cadeias produtivas com abordagem da manufatura sustentável*. Rio de Janeiro, 13 a 16 de outubro. 15p. 2008.
- SANTOS, G. G. D. Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.
- STAROSTINA, V. DAMGAARD, A. ERIKSEN, M. CHRISTENSEN, T. Waste management in the Irkutsk region, Siberia, Russia: An environmental assessment of alternative development scenarios. *Waste Management & Research*, 2017.
- STEPANOV, J. UBAVIN, D. PROKIC, D. BUDAK, I. STEVANOVIĆ-CARAPINA, H. STANISAVLJEVIĆ, N. Comparison of Municipal Waste Management Systems Using Lca. South Backa Waste Management Region. A Case Study. *Environment Protection Engineering*, v. 44, 2018.
- WANG, D. HE, J. TANG, Y-T. HIGGITT, D. ROBINSON, D. Life cycle assessment of municipal solid waste management in Nottingham, England: Past and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 251, 2020.
- WILSON, E. MCDUGALL, F. WILLMORE, J. Euro-trash: searching for a more sustainable approach to waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 31, p. 327–346, 2001.