

III-111 – DIAGNÓSTICO E ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DO MUNICÍPIO DE SÃO GABRIEL – RS

Caroline Cipolatto Ferrão⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Mestranda em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC).

Diosnel Antonio Rodríguez López⁽²⁾

Engenheiro de Minas pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Mestrado em Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Doutorado em Engenharia de Materiais Metalurgia e Meio Ambiente pela Technische Universität Berlin (TU Berlin).

Adriane Lawisch Rodríguez⁽³⁾

Engenheira Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Mestrado em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Doutorado em Engenharia pela Technische Universität Berlin (TU Berlin).

Ênio Leandro Machado⁽⁴⁾

Químico Industrial pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Mestrado em Química pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Endereço⁽¹⁾: Rua Baden Powell, 413 - São José - Santa Maria - RS - CEP: 97110-120 - Brasil - Tel: (55) 32263269 - e-mail: carolinecipolatto@gmail.com

RESUMO

A quantidade e a variedade dos resíduos sólidos urbanos gerados causam dificuldades na administração e no gerenciamento dos mesmos sendo, portanto, um grande problema para a maioria dos municípios brasileiros. A ausência de um serviço de coleta de resíduos eficiente e da disposição final adequada ocasiona problemas ambientais, sociais e danos à saúde pública. Sendo assim, torna-se fundamental o investimento no setor e a escolha das melhores e mais adequadas práticas em acordo com as necessidades de cada município.

Pensando nisso, o conhecimento qualitativo e quantitativo dos resíduos sólidos urbanos dos municípios e o levantamento de informações detalhadas das práticas atuais são importantes para um diagnóstico assertivo da situação. Esse diagnóstico pode servir como base para a utilização de instrumentos que auxiliem na tomada de decisão. O instrumento principal nesta área é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), o qual auxilia na obtenção da melhor opção quanto ao desempenho do sistema de gerenciamento de resíduos do ponto de vista ambiental.

Visto isso, o presente trabalho apresenta o detalhamento do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos do município de São Gabriel – RS e a aplicação da ACV com o uso do software Umberto NXT LCA, com banco de dados da *Ecoinvent 3.0*, a fim de visualizar os impactos ambientais gerados pelo cenário atual e pela simulação de um cenário com a implantação de um aterro sanitário no município. O cenário atual contempla as etapas de coleta, transbordo com triagem, transporte e disposição final em aterro sanitário em outro município. As categorias de impacto analisadas foram: potencial de acidificação, mudanças climáticas, potencial de eutrofização, toxicidade humana, uso do solo, oxidação fotoquímica e toxicidade terrestre.

Os resultados mostram que no cenário atual a etapa da coleta destaca-se das demais quanto a todas as categorias de impacto analisadas. Já no cenário proposto, a implantação de um aterro sanitário local aumenta expressivamente os valores finais de cada um dos impactos considerados mostrando a importância de um estudo detalhado da viabilidade da sua execução.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de Gerenciamento de Resíduos, Resíduos Sólidos Urbanos, Análise do Ciclo de Vida.

INTRODUÇÃO

O aumento no volume de resíduos sólidos urbanos gerados e a sua heterogeneidade são consequências da qualidade de vida da população, da produção, da diversidade de atividades e dos padrões de consumo (RIPA *et al.*, 2017; RONG *et al.*, 2017). Quanto a isso, tem-se que a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil foi de

79,9 milhões de toneladas em 2015, representando um crescimento de 31,3% com relação ao ano de 2010 (ABRELPE, 2010; 2015b).

A gestão sustentável dos resíduos sólidos urbanos tornou-se uma preocupação social e ambiental importante, visto que quando feita de forma inadequada provoca impactos ambientais negativos como a poluição do ar, do solo e da água, além de problemas de saúde e segurança (YAY, 2015). Com isso, técnicas de análise de sistemas gerenciais têm sido aplicadas para controlar os fluxos destes resíduos através de uma gama de metodologias integradoras, de modo a cumprir a necessidade de assegurar o desenvolvimento sustentável (GHINEA *et al.*, 2014).

Seguindo nesta linha, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), busca o estabelecimento de um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos, tendo em vista o aumento da eficiência dos serviços. Possui como princípio básico o cumprimento da ordem de priorização de a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final adequada, sendo no caso dos resíduos sólidos urbanos através de aterros sanitários regionais. Para mais, fomenta ainda a regionalização da gestão, estimula a recuperação energética dos gases gerados na unidade de disposição final e incita à implementação da Análise do Ciclo de Vida (ACV).

Portanto, gerir os resíduos sólidos urbanos do “berço ao túmulo” é um dos maiores desafios para a gestão sustentável, visto que devem ser adotadas as práticas e serviços mais adequados para a problemática pensando na redução e na eliminação dos mesmos (YAY, 2015). Além disso, o detalhamento sistemático dos processos é determinante para o desenvolvimento de soluções que apresentem os reflexos econômicos positivos oriundos da redução das emissões ambientais e do uso de energia, assim como a redução dos impactos negativos do mau gerenciamento sobre o meio ambiente (JAUNICH *et al.*, 2016).

Dentre várias alternativas para o processo, têm-se como as principais a segregação na fonte, coleta convencional e/ou mecanizada, coleta seletiva, triagem, compostagem e a utilização de aterro sanitário. Nesse sentido, evidencia-se a importância da segregação na fonte, a qual gera reflexos na eficácia do sistema de gestão de resíduos em razão de causar oscilação na quantidade e qualidade dos resíduos que seguem para as etapas seguintes como na coleta (SUKHOLTHAMAN E SHARP, 2016). Deste modo, é uma medida dependente diretamente da colaboração da população, o que torna o incentivo para esta prática indispensável. Struk (2017) afirma que quanto menor o esforço exigido e menor o tempo de deslocamento para o descarte deste material, maior é o número de pessoas adeptas.

De acordo com a legislação vigente no Brasil, a coleta dos RSD é responsabilidade dos municípios, podendo ser feita pelo mesmo ou de forma terceirizada por contratação via licitação. O tipo de recolhimento é especificado no termo de referência do processo licitatório, juntamente como as planilhas orçamentárias que apresentam o valor máximo que a prefeitura está disposta a pagar pelos serviços. As planilhas orçamentárias devem discriminar por atividade (coleta, unidade de transbordo e transporte, e disposição final) todos os custos referentes à mão de obra; à operacionalidade; à aquisição, aluguel e manutenção de veículos e equipamentos; às despesas administrativas e os impostos e taxas.

Na busca pela redução dos custos, dos impactos ambientais e sociais e da maior efficientização do sistema de coleta de resíduos, Kinobe *et al.* (2015) salienta que a utilização de ferramentas do Sistema de Informação Geográfica (GIS) permite a redução do número total de viagens, das distâncias, do tempo de coleta, diminuindo o consumo de combustível e as emissões gasosas para a atmosfera. A logística do sistema de transporte de resíduos exige, em muitos casos, a existência de uma unidade de transferência/transbordo, visto que os aterros sanitários localizam-se, no caso do Rio Grande do Sul, em poucos municípios e distantes dos centros urbanos. Estas unidades de transbordo servem como um depósito temporário para os resíduos oriundos da coleta. À medida que os resíduos chegam, é feito o seu carregamento em um caminhão maior, o qual permite uma economia no transporte a longas distâncias até o aterro sanitário (ALELUIA E FERRÃO, 2016).

Neste contexto, a existência de unidades de transbordo em municípios de pequeno e médio porte pode ser uma alternativa para a implantação de unidades de triagem. O espaço, desde que amplo e adequado, é uma ótima escolha para viabilizar esta atividade, visto que os resíduos são descarregados na unidade e ficam acumulados ali por um tempo máximo de 24 horas. Monteiro e Zveibil (2001) afirmam que mesmo misturados, com gordura, terra e outros contaminantes, é possível segregar de 3 a 6% do volume recebido.

Rodrigues *et al.* (2011) estudaram a viabilidade da implantação de uma usina de triagem no aterro sanitário de Cachoeira Paulista – SP e concluíram que 24% dos materiais possuem potencial de reciclagem. Konrad *et al.* (2014) caracterizou os resíduos de um consórcio do interior do Estado do Rio Grande do Sul, composto por 30 municípios e constatou que 18,2% do peso total correspondem a materiais recicláveis.

É importante ressaltar que a destinação final remete aos resíduos sólidos que possuem possibilidade de tratamento ou potencial energético. Em contraponto, a disposição está relacionada com os rejeitos, os quais devem ser dispostos de maneira ambientalmente adequada, obedecendo às normas operacionais a fim de minimizar os impactos ambientais e evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança (BRASIL, 2010; ABRELPE, 2015a).

Quanto à disposição final adequada, o aterro sanitário é a forma mais usual no mundo, devido à sua simplicidade construtiva e operacional, além dos custos econômicos envolvidos (YAY, 2015). No Brasil e no Rio Grande do Sul 58,7% e 70,6% dos resíduos respectivamente, são encaminhados para aterros sanitários, enquanto que o restante ainda é disposto de forma inadequada no solo (ABRELPE, 2015b).

Na busca pelo sistema de gestão de resíduos que apresenta o melhor desempenho do ponto de vista ambiental, pode-se utilizar a ACV. Quando aplicado, este instrumento permite que os tomadores de decisões e empresas que trabalham no ramo vejam através das simulações dos cenários como as mudanças no sistema contribuem com impactos ambientais (WINKLER E BILITEWSKI, 2007).

Para isso, este instrumento realiza a compilação e avaliação de um grande volume de informações, das entradas e saídas consideradas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema ao longo do seu ciclo de vida (RODRIGUES *et al.*, 2008). De acordo com a ISO 14.040 (ABNT, 2006), o estudo completo da ACV compreende quatro fases principais, sendo elas a definição dos objetivos e escopo, a análise de inventário através de uma compilação detalhada dos insumos ambientais (recursos e fluxo de energia) e das saídas (emissões e resíduos), avaliação de impacto e a interpretação dos resultados do inventário.

Muitos pesquisadores já utilizaram este instrumento para auxiliar na tomada de decisão. Ripa *et al.* (2017) realizou a ACV para analisar os impactos ambientais de diferentes estratégias de gestão dos resíduos sólidos urbanos em Nápoles. Para isso, foi utilizada a base de dados da Ecoinvent v.3.1 (2015) e o software SimaPro versão 8.0.5.13. Os resultados mostraram que os maiores impactos foram causados pelo baixo índice de coleta seletiva e pelo transporte – expor o detalhamento dos maiores impactos, devido à ausência de tratamento dos resíduos.

Gomes *et al.* (2015) comparou, através da ferramenta da ACV, o potencial impacto ambiental gerado por dois cenários distintos de gerenciamento de resíduos sólidos domésticos, o primeiro com central de triagem e aterro sanitário, e o segundo com central de triagem, compostagem e aterro sanitário. O melhor cenário identificado foi o segundo, onde se obteve reduções nas emissões atmosféricas na ordem de 77,1% e de 72,4% na geração de rejeitos, o que causa um aumento de vida útil do aterro sanitário.

Em Porto Alegre foi utilizada a ferramenta ACV para avaliar oito cenários com diferentes alternativas de coleta (seletiva e containerizada), e de tratamento (reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, processos térmicos e disposição em aterro). O objetivo foi encontrar a melhor combinação de técnicas e tecnologias que obtenham um sistema ambientalmente efetivo que atenda à PNRS, principalmente com relação ao envio apenas de rejeitos aos aterros sanitários, com custo viável e que seja aceitável da população (REICHERT E MENDES, 2014).

Visto isso, o objetivo deste estudo é obter um diagnóstico aprofundado do SGRSU do município de São Gabriel – RS e, através da aplicação da ferramenta ACV, definir qual o modelo de gerenciamento mais adequado para ser implantado na localidade devido as suas peculiaridades. Serão propostos dois cenários para a comparação, sendo o primeiro o sistema atual, com coleta convencional, transporte, unidade de transbordo, triagem e disposição final em aterro sanitário localizado em outro município e o segundo com o diferencial da construção de um aterro sanitário municipal com uma unidade de triagem. O processo de tomada de decisão deverá atender as exigências da PNRS, levando em consideração a solução economicamente viável, socialmente aceitável e ambientalmente efetiva.

METODOLOGIA

A metodologia deste artigo é dividida em duas partes. A primeira corresponde à coleta de dados buscando elaboração do diagnóstico atual do Sistema de Gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (SGRSU) do município. A segunda etapa abrange a transferência dos dados obtidos para o programa computacional UMBERTO NXT LCA, de modo a realizar as avaliações do cenário atual e do cenário proposto.

Para iniciar o diagnóstico do SGRSU do município de São Gabriel foram reunidas informações do ano de 2016, de janeiro a dezembro, referentes às etapas de coleta, transporte, unidade de transbordo, triagem e disposição final em aterro sanitário. Estas informações foram obtidas com a empresa contratada responsável por estes serviços, através da realização de questionários. Para mais, foram coletadas informações gerais referentes aos veículos utilizados, dados mensais da quilometragem e consumo de combustível por frota. As pesagens dos resíduos na chegada e saída do transbordo, assim como na chegada do aterro foram monitoradas, do mesmo modo como o número de viagens realizadas, a quantidade de resíduos triados, e o consumo de água e luz das dependências utilizadas.

Pensando no planejamento do sistema de gestão, a gravimetria é uma importante ferramenta para o conhecimento detalhado do que é gerado, pois demonstra os tipos e quantidade de resíduos coletados, atribuindo valores em porcentagem com relação a sua massa (REZENDE *et al.*, 2013; KONRAD *et al.*, 2014). Portanto, optou-se pela realização da análise gravimétrica nos meses de maio, agosto e novembro de 2016 e fevereiro de 2017, a fim de obter dados em um horizonte anual.

A literatura apresenta diversos métodos para a determinação da composição gravimétrica, sendo que a maioria principia pelo quarteamento da amostra conforme a NBR 10.007 (ABNT, 2004), referente à amostragem de resíduos. A caracterização da composição física dos resíduos será realizada de forma semelhante à metodologia descrita por Pessin *et al.* (2002), na qual foram coletados aleatoriamente sacos de resíduos e acondicionados em quatro bombonas de 200 L. Após o rompimento dos sacos, foi realizada a homogeneização da amostra seguida por quarteamento até a obter uma amostra final de 200 L.

Para o trabalho, devido ao grande volume de resíduos que chegam à unidade de transbordo, foi utilizada uma retroscavadeira para a retirada de uma concha de resíduos de cada caminhão que chega no dia anterior à amostragem. As amostragens foram feitas em uma semana com tempo estável, na terça e quinta-feira. Após a homogeneização de todo o volume recolhido, foram realizados sucessivos quarteamentos até a obtenção de aproximadamente 100 kg de resíduos. A partir disso, foi executada a separação dos resíduos em orgânico, rejeito, plástico, papel, metal e vidro e então foi feita a pesagem em balança eletrônica.

Todas as informações levantadas foram utilizadas para o maior detalhamento do funcionamento das unidades de GRSU no estudo da ACV do município de São Gabriel. Sendo assim, o escopo foi delimitado a partir do acondicionamento dos resíduos gerados para a coleta até a sua disposição final em aterro sanitário. O Cenário 1 representa o modelo atual de gerenciamento, com coleta convencional, transbordo, triagem, transporte e disposição final. Já o Cenário 2 contempla a ideia da construção de um aterro no próprio município.

Para a análise do inventário foram elaborados fluxogramas de processo para os dois cenários. Nesta análise foram quantificadas as entradas e saídas (resíduos sólidos, transporte, energia, matéria-prima, entre outros) relacionadas com o processo. Como o Cenário 2 se difere apenas quanto a construção do aterro sanitário com unidade de triagem, para exemplificação a figura 1 apresenta o fluxograma do Cenário 1.

Posteriormente foi realizada a avaliação dos impactos com a utilização de uma ferramenta de ACV, a partir da análise do inventário. A ferramenta de ACV utilizada será o software Umberto NXT LCA versão 7.2. O método para a seleção das categorias de impacto utilizado foi o CML 2001. Os impactos ambientais analisados foram o potencial de acidificação (kg de SO₂-Eq), mudanças climáticas (kg CO₂-Eq), potencial de eutrofização (kg PO₄-Eq), toxicidade humana (kg 1,4-DCB-Eq), uso do solo (m²a), oxidação fotoquímica (kg de ozônio formado) e toxicidade terrestre (kg 1,4-DCB-Eq).

O banco de dados aplicado para o inventário foi da *Ecoinvent 3.0*. É importante salientar que este banco de dados não possui todos os parâmetros necessários conforme a real situação brasileira, sendo necessária a escolha de dados que satisfaçam a média global.

Para a simulação dos cenários é necessária a utilização das informações levantadas no diagnóstico a fim de obter a compilação dos dados para visualizar as melhores alternativas para o sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. A análise estatística dos resultados alcançados foi feita com o programa computacional Excel.

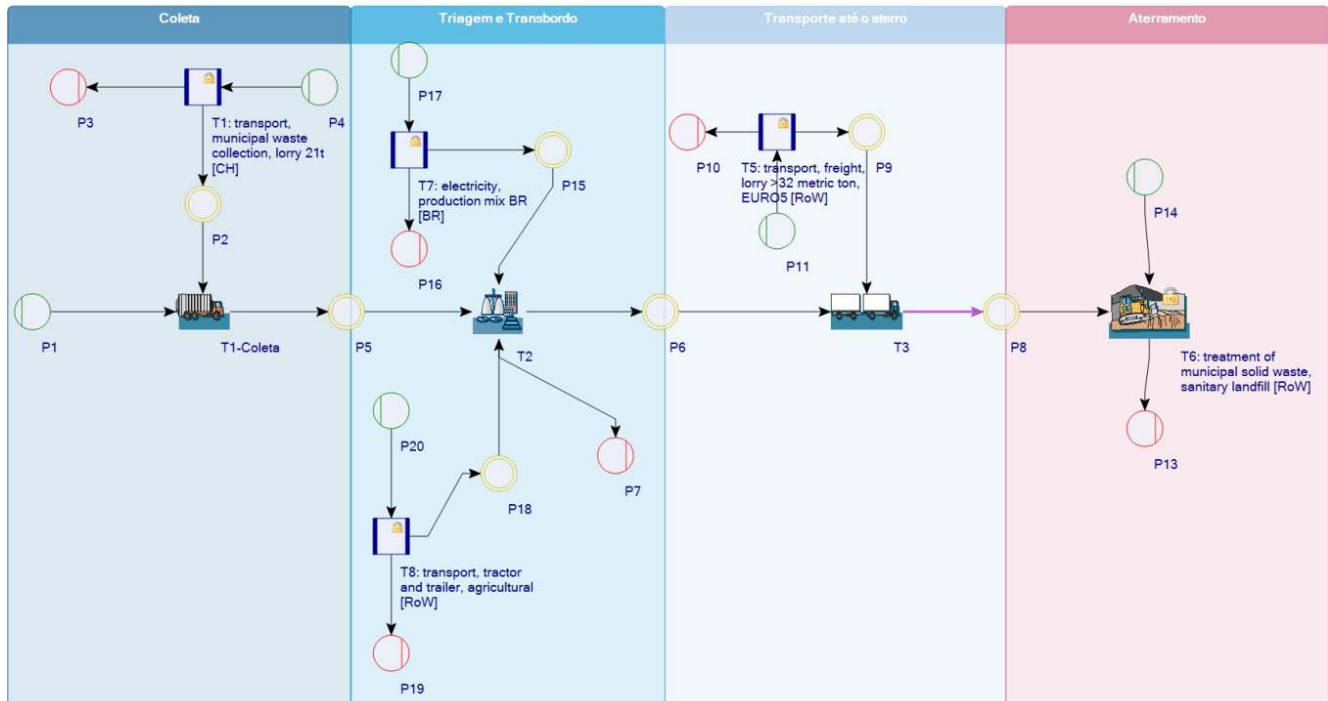


Figura 1: Fluxograma do Cenário 1.

RESULTADOS

O município de São Gabriel está localizado na fronteira oeste do estado do Rio Grande do Sul e segundo dados do Ibge (2016), a população estimada no ano de 2016 foi de 62.874 habitantes. No ano de 2016 o total de RSU coletados foi de 11.528,40 ton, o que corresponde a uma média de 960,70 ton/mês e a uma geração per capita de 0,588 kg/hab·dia. A coleta é convencional e feita de maneira direta sendo, portanto, porta a porta com o recolhimento manual e a utilização de 03 (três) caminhões compactadores de carga traseira com capacidade volumétrica igual a 15 m³. A guarnição de cada caminhão tem 01 (um) motorista e 03 (três) coletores, com a como ferramentas e utensílios necessários à perfeita realização dos trabalhos.

A frequência da coleta é função basicamente do tempo máximo que os resíduos podem permanecer nos locais de geração, sem causar problemas decorrentes da sua decomposição. Esta frequência dada a partir da setorização do município, podendo ser alternada par (segundas, quartas e sextas) manhã e tarde, alternada ímpar (terças, quintas e sábados) manhã e tarde, e diária. Portanto, o município é dividido em 05 (cinco) setores e os horários de coleta no turno da manhã, tarde e noite são das 06:00 às 14:20, das 15:40 às 18:40 e das 19:40 às 24:00 respectivamente.

De janeiro a novembro de 2016, cada caminhão da coleta fez em média 1.982 km/mês, o que resultou em aproximadamente 129 saídas mensais para a coleta de resíduos até o transbordo. A área do transbordo está localizada no bairro Corredor da Balança, junto ao antigo lixão municipal. No local é feita a triagem de todos os resíduos que chegam, com a mão de obra de 9 (nove) funcionários de segunda à sexta das 08:00 às 12:00 e das 13:30 às 17:30, e aos sábados das 08:00 às 12:00; e o material é prontamente prensado, amarrado e vendido.

A tabela 1 mostra os resultados obtidos com os percentuais da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos de São Gabriel a partir das amostragens realizadas nos meses de maio, agosto e novembro de 2016, e

fevereiro de 2017. Visto isso, tem-se que o percentual total de materiais passível de reciclagem atinge 22,17%, que o volume de matéria orgânica chega a 49,93% e os rejeitos são apenas 27,90%.

Konrad *et al.* (2014) caracterizou os resíduos de um consórcio do interior do Estado do Rio Grande do Sul que mantém unidade de triagem, compostagem e destinação final dos resíduos. Constatou-se que 18,2% do peso total correspondem a materiais recicláveis, 60,3% eram materiais orgânicos e 21,5% rejeitos tendo, portanto, que 80% dos resíduos passíveis de reaproveitamento. Portanto, a usina de triagem de São Gabriel contribui de forma positiva para a redução dos resíduos encaminhados para o aterro, e a realização da compostagem ajudaria ainda mais nessa redução.

Tabela 1: Gravimetria do município de São Gabriel.

Materiais	Maió 2016	Agosto 2016	Novembro 2016	Fevereiro 2017	Média
Plástico	13,00%	4,68%	7,15%	14,12%	9,74%
Papel	12,50%	7,12%	4,10%	9,28%	7,71%
Metais	3,85%	1,22%	4,00%	3,15%	3,05%
Vidro	1,99%	1,12%	1,83%	1,74%	1,67%
Orgânico	41,34%	39,04%	74,67%	44,65%	49,93%
Rejeito	29,48%	46,82%	8,24%	27,06%	27,90%
Totais	100%	100%	100%	100%	100%

Os rejeitos oriundos da triagem e os resíduos das cargas que não podem ser triadas devido a problemas operacionais são colados em um veículo com caçamba basculante de 55 m³ com o auxílio de uma retroescavadeira. Este veículo percorre em média 9.607 km/mês, fazendo 33 viagens/mês para destinar estes resíduos para o aterro sanitário de Santa Maria, localizado a uma distância de 160 km.

A utilização do software Umberto NXT LCA foi realizada com o intuito de determinar os potenciais impactos ambientais. Além disso, buscou-se a análise dos resultados do comparativo entre o cenário atual com coleta convencional, transporte, unidade de transbordo, triagem e disposição final em aterro sanitário; e o cenário proposto, com a construção de um aterro sanitário municipal com unidade de triagem. As tabelas 2 e 3 mostram as contribuições de cada etapa do sistema de gerenciamento de resíduos por categoria de impacto ambiental.

Tabela 2: Contribuições de cada etapa por categoria de impacto ambiental no Cenário 1.

Categoria de Impacto Ambiental/Etapa	Coleta	Transbordo e Triagem	Transporte até o aterro	Aterramento	Total
Potencial de Acidificação (kg SO₂-Eq)	106.416,52	1.360,66	48,85	186,87	108.012,89
Mudanças Climáticas (kg CO₂-Eq)	19.355.949,18	179.669,01	12.559,20	521.537,71	20.069.715,09
Potencial de Eutrofização (kg PO₄-Eq)	19.594,75	309,09	10,12	596,39	20.510,35
Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB-Eq)	3.185.946,67	183.313,12	3.028,18	19.472,53	3.391.760,50
Uso do Solo (m²a)	124.965,63	17.928,18	1.548,51	4.702,63	149.144,95
Oxidação Fotoquímica (kg ozônio formado)	3.028,60	58,86	1,77	182,52	3.271,75
Toxicidade Terrestre (kg 1,4-DCB-Eq)	1.331,66	51,09	2,44	20,55	1.405,73

Examinando os resultados do Cenário 1, fica nítida a relevância da etapa da coleta quanto aos impactos ambientais gerados pelo sistema atual como um todo. Isso é corroborado pelo percentual médio de 93,65% de representatividade do valor total dos impactos gerados pela coleta do município. Esse alto percentual pode ser explicado pelas emissões atmosféricas liberadas pelos veículos coletores. Um grande agravante é a ausência

do controle rigoroso dos roteiros da coleta, o qual interfere negativamente na quilometragem realizada, no tempo que os caminhões ficam ligados e na quantidade de paradas realizadas.

Os percentuais na coleta para potencial de acidificação, mudanças climáticas, potencial de eutrofização, toxicidade humana, uso do solo, oxidação fotoquímica e toxicidade terrestre foram respectivamente: 98,52%, 96,44%, 95,54%, 93,93%, 83,79%, 92,57% e 94,73%. Quanto ao potencial de acidificação, que obteve o maior percentual, podemos citar que as emissões de óxidos de nitrogênio e o dióxido de enxofre dos caminhões foram os principais responsáveis.

O transbordo com a triagem mostrou maior influência na categoria de uso do solo, com um percentual de impacto ambiental de 12,02% devido a ocupação para a este tipo de atividade. Quanto a isso, é importante pontuar que esta etapa localiza-se em uma área já impactada pela existência de um antigo lixão. A segunda categoria com maior percentual nesta etapa foi a de toxicidade humana, com 5,40% decorrente principalmente da liberação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos dos maquinários utilizados.

Já o transporte até o aterro e o próprio aterramento apresentaram os menores percentuais de representatividade quando comparados com as outras etapas. Isso ocorreu pelo fato de o transporte e o aterramento ser atividades pontuais. O aterramento apontou a categoria de oxidação fotoquímica como sendo a de maior significância, com 5,58% correspondentes às emissões de metano. Já o transporte quando comparado com o todo, exerce menor influencia por ser realizado 1 ou 2 vezes ao dia apenas, e por ser uma viagem de longa distância que não exige tanto como os caminhões da coleta.

Tabela 3: Contribuições de cada etapa por categoria de impacto ambiental no Cenário 2.

Categoria de Impacto Ambiental/Etapa	Coleta	Triagem	Transporte	Construção do aterro	Aterramento	Total
Potencial de Acidificação (kg SO₂-Eq)	106.416,52	1.360,66	5,31	61.277,01	186,87	169.246,36
Mudanças Climáticas (kg CO₂-Eq)	19.355.949,18	179.669,01	882,40	7.930.986,28	521.537,71	27.989.024,57
Potencial de Eutrofização (kg PO₄-Eq)	19.594,75	309,09	1,1	12.150,70	596,39	32.652,03
Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB-Eq)	3.185.946,67	183.313,12	126,17	3.327.298,67	19.472,53	6.716.157,16
Uso do Solo (m²a)	124.965,63	17.928,18	15,54	4.608.007,91	4.702,63	4.755.619,89
Oxidação Fotoquímica (kg ozônio formado)	3.028,60	58,86	0,14	2.506,35	182,52	5.776,47
Toxicidade Terrestre (kg 1,4-DCB-Eq)	1.331,66	51,09	0,14	2.227,84	20,55	3.631,27

Observando os resultados do Cenário 2 mostrados na Tabela 3, pode se afirmar que as os impactos ambientais relacionados à etapa de coleta, transbordo e triagem e aterramento apresentam os mesmos valores. Esta igualdade se justifica uma vez que não foi mudada nenhuma rota de coleta, além de ter sido coletada e aterrada a mesma quantidade de resíduos.

Porém, como esperado, o Cenário 2 mostrou que a construção de um aterro sanitário tem a predominância do valor total dos impactos gerados quando comparado com as outras etapas do gerenciamento, tendo um percentual médio de 50,42%. As categorias de impactos que se evidenciaram foram o uso do solo, a toxicidade terrestre e a toxicidade humana com os percentuais respectivos de 96,90%, 61,35% e 49,54%. Estes impactos estão associados às atividades envolvidas na construção do aterro como a terraplanagem, a construção de leiras, o uso de combustíveis pelos veículos na construção, entre outras.

A etapa de coleta continua em destaque, com um percentual de representatividade de 47,32% do valor total dos impactos gerados, ressaltando que seus quantitativos continuam os mesmos do Cenário 1. Sua significância foi destacada nas categorias de impacto de potencial de acidificação, mudanças climáticas, potencial de eutrofização e oxidação fotoquímica com 62,88%, 69,16%, 60,01% e 52,43% respectivamente.

Diferentemente do Cenário 1, ao considerar o todo, a categoria de mudanças climáticas se sobressaiu quanto às demais categorias devido às altas emissões atmosféricas de dióxido de carbono.

A unidade de triagem e o aterramento apresentaram um percentual de representatividade de 1,13%. A triagem mostrou como categoria principal a toxicidade humana com 2,73%, diferentemente do Cenário 1, mas com a mesma justificativa. Para a etapa de aterramento, a categoria de oxidação fotoquímica continuou sendo a mais relevante, com 3,16%. Cabe ressaltar ainda, que há diferença significativa em relação ao transporte até o aterro sanitário, uma vez que a distância a percorrer seria reduzida de forma significativa. Isso reflete a diminuição de combustível utilizado nesta etapa e conseqüentemente no percentual médio de impactos ambientais de 0,00%, quando comparado com as demais etapas.

A tabela 4 apresenta o crescimento percentual dos valores das categorias de impacto do Cenário 2 com relação ao Cenário 1. A categoria mais afetada é a de uso do solo por ter 149.144,95 m²a no Cenário 1 e 4.755.619,89 m²a no Cenário 2, denotando um crescimento de 3.088,56%. A segunda categoria mais representativa é a de toxicidade terrestre com 158,32%, sendo que no Cenário 1 exibiu um valor de 1.405,73 kg 1,4-DCB-Eq e no Cenário 2 de 3.631,27 kg 1,4-DCB-Eq.

Tabela 4: Crescimento percentual dos valores das categorias de impacto do Cenário 2 com relação ao Cenário 1.

Potencial de Acidificação	Mudanças Climáticas	Potencial de Eutrofização	Toxicidade Humana	Uso do Solo	Oxidação Fotoquímica	Toxicidade Terrestre
56,69%	39,46%	59,20%	98,01%	3.088,59%	76,56%	158,32%

Como dito anteriormente, existem muitos estudos na área de ACV aplicado a gestão de resíduos sólidos urbanos. Zappe (2016) executou uma metodologia similar ao presente artigo para a simulação da ACV de um consórcio entre municípios do Vale do Rio Pardo/RS. Seus resultados mostraram também que a construção e operação de um aterro novo acarretam um aumento importante dos valores associados a cada impacto.

Carra e Reichert (2014) aplicaram o modelo computacional IWM-2 em Porto Alegre/RS com as seguintes categorias de impactos ambientais: mudanças climáticas, toxicidade humana, formação de foto-oxidantes, acidificação, eutrofização e uso de energia. O cenário inicial deste estudo tem as etapas de coleta, triagem, compostagem e disposição final em aterro sanitário. Os resultados mostraram que o aterro sanitário é a etapa que mais influencia nos impactos ambientais e a categoria mais impactada é a de mudanças climáticas.

CONCLUSÕES

A avaliação ambiental do cenário atual e do cenário proposto a partir da ferramenta de ACV permitiu a compreensão e o detalhamento do processo de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de São Gabriel, além da identificação dos fluxos de matéria e energia envolvidos. Com os resultados é possível sugerir adequações ou alterações no cenário atual tendo em vista o aumento dos ganhos ambientais.

Para o município de São Gabriel, o Cenário 2 acarretaria em maiores impactos ambientais para o município devido a construção do aterro sanitário. Porém em longo prazo essa escolha promove a ideia principal da regionalização da gestão dos resíduos sólidos urbanos e impulsiona outras melhorias no sistema de gerenciamento. Para mais, o aterro sanitário pode ser projetado e utilizado para receber os resíduos dos municípios do entorno.

Outro ponto importante é que ambos cenários mostraram a relevância dos impactos ambientais gerados pela coleta. Algumas alterações simples já sugerem a redução destes impactos gerados. Um exemplo é o monitoramento da frota e a utilização de um software com georreferenciamento que crie os melhores roteiros de coleta a fim reduzir o tempo do serviço, a queima de combustíveis, e identificar com exatidão as perdas do sistema.

Pensando ainda em alternativas, outra sugestão é o estímulo à segregação na fonte com a separação dos resíduos secos dos úmidos em recipientes diferentes pela população. Diferentemente da ideia de coleta seletiva, esta prática não exige o aumento da frota e não interfere nos gastos com o transporte da coleta. Além

disso, facilita as atividades em uma unidade de triagem visto que quando devidamente acondicionados, os diferentes tipos de resíduos não se misturam mesmo que sejam transportados pelo mesmo caminhão.

O aumento significativo na porcentagem e na qualidade dos materiais passíveis de reciclagem que chegam ao aterro sanitário propicia ainda o comércio dos mesmos, com retorno financeiro que pode quitar o investimento inicial em longo prazo e pagar a mão de obra necessária para a atividade de triagem. Já o recebimento da matéria orgânica pode influenciar na construção de um pátio de compostagem com o objetivo de utilizar o composto final nos serviços de jardinagem do município. Sendo assim, apenas os rejeitos seriam encaminhados para o aterro sanitário.

Dessa forma, a utilização da ACV auxilia de forma positiva a tomada de decisão para alteração de projetos existentes ou na elaboração de novos na área de gerenciamento de resíduos. É importante salientar ainda que as alternativas apontadas devem ser acompanhadas por estudos da sua viabilidade econômica, visto que esse é o ponto determinante para qualquer tomada de decisão. Portanto, as melhores práticas obtidas pelas comparações entre cenários na ACV, devem fomentar a ideia de sustentabilidade ambiental, serem de fácil entendimento e implantação, e principalmente, viáveis economicamente para os municípios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR 10.007: Amostragem de resíduos sólidos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2004.
2. _____. ISO NBR 14.040: Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, 2006.
3. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010**.
4. _____. **Estimativas dos Custos para Viabilizar a Universalização da Destinação Adequada de Resíduos Sólidos no Brasil 2015a**.
5. _____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo 2015b.
6. ALELUIA, J.; FERRÃO, P. Characterization of urban waste management practices in developing Asian countries: A new analytical framework based on waste characteristics and urban dimension. **Waste Management**, v. 58, p. 415-429, 12// 2016. ISSN 0956-053X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16302409> >.
7. BRASIL. Lei Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**– Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato200, p. 73, 2010.
8. CARRA, S. H. Z.; REICHERT, G. A. Avaliação do ciclo de vida de resíduos sólidos urbanos: avaliação de dois cenários para o gerenciamento integrado de resíduos sólidos na cidade de Porto Alegre/RS. **4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, 2014.
9. GOMES, L. P. et al. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, p. 449-462, 2015. ISSN 1413-4152. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522015000300449&nrm=iso >.
10. IBGE. Cidades. 2016. Disponível em: < <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=431830&search=|infogr%Elficos:-informa%E7%F5es-completas> >. Acesso em: maio de 2016.
11. JAUNICH, M. K. et al. Characterization of municipal solid waste collection operations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 114, p. 92-102, 11// 2016. ISSN 0921-3449. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916301860> >.
12. KINOBE, J. R. et al. Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. **Habitat International**, v. 49, p. 126-137, 10// 2015. ISSN 0197-3975. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019739751500106X> >.
13. KONRAD, O. et al. Composição gravimétrica dos resíduos sólidos destinados para uma central de triagem, compostagem e disposição final. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 5, n. 1, p. 284-292, 2014. ISSN 2179-6858.
14. MONTEIRO, J. H. P.; ZVEIBIL, V. Z. Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. In: (Ed.). **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**: IBAM, 2001.
15. PESSIN, N.; MANDELLI, S.; QUISSINI, C. Diagnóstico Preliminar da Geração de Resíduos Sólidos Domésticos em Sete Municípios de Pequeno Porte da Região do Vale do Caí-RS. **III Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental-Gestão Ambiental, Urbana e Industrial**, 2002.

16. REICHERT, G. A.; MENDES, C. A. B. Avaliação do ciclo de vida e apoio à decisão em gerenciamento integrado e sustentável de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 301-313, 2014. ISSN 1413-4152. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522014000300301&nrm=iso >.
17. REZENDE, J. H. et al. Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 1-8, 2013. ISSN 1413-4152. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522013000100001&nrm=iso >.
18. RIPA, M. et al. The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 445-460, 2017. ISSN 0959-6526.
19. RODRIGUES, C. R. B. et al. Sistemas Computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do Produto (ACV). **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro**, 2008.
20. RODRIGUES, J. et al. Proposta de Implantação de um Centro de Triagem de Materiais Recicláveis junto ao Aterro Sanitário de Cachoeira Paulista - SP. **IX Encontro Latino Americano de Pós Graduação**, 2011.
21. RONG, L. et al. Assessment of the potential utilization of municipal solid waste from a closed irregular landfill. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, Part 1, p. 413-419, 1/20/ 2017. ISSN 0959-6526. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615014341> >.
22. STRUK, M. Distance and incentives matter: The separation of recyclable municipal waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 155-162, 7// 2017. ISSN 0921-3449. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917300320> >.
23. SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, v. 52, p. 50-61, 6// 2016. ISSN 0956-053X. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1630109X> >.
24. WINKLER, J.; BILITEWSKI, B. Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management. **Waste management**, v. 27, n. 8, p. 1021-1031, 2007. ISSN 0956-053X.
25. YAY, A. S. E. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 284-293, 2015. ISSN 0959-6526.
26. ZAPPE, A. L. **Avaliação do ciclo de vida do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos de um consórcio intermunicipal no Rio Grande do Sul, Brasil.** Pós Graduação em Tecnologia Ambiental Universidade de Santa Cruz do Sul 2016.